

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Frederico Aires Rodrigues da Costa Reis

**MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM INDENTADOR
INSTRUMENTADO E INTERFERÔMETRO RADIAL**

Florianópolis

2012

Frederico Aires Rodrigues da Costa Reis

MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM INDENTADOR
INSTRUMENTADO E INTERFERÔMETRO RADIAL

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando
Albertazzi Gonçalves Júnior.

Coorientador: Dr. Matias Roberto
Viotti.

Florianópolis

2012

**Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina**

R375m Reis, Frederico Aires Rodrigues da Costa
Medição de tensões residuais com indetador instrumentado
e interferômetro radial [dissertação] / Frederico Aires
Rodrigues da Costa Reis ; orientador, Armando Albertazzi
Gonçalves Júnior. - Florianópolis, SC, 2012.
165 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3.
Holografia. I. Gonçalves Júnior, Armando Albertazzi. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

Frederico Aires Rodrigues da Costa Reis

MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM INDENTADOR
INSTRUMENTADO E INTERFERÔMETRO RADIAL

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 14 de Março de 2012.

Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.
Orientador

Matias Roberto Viotti Dr.
Coorientador

Ricardo Suterio, Dr.
Pesquisador e Professor no INPE
(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)
Avaliador

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Dr.
Professor LabMetro
Avaliador

Celso Luiz Nickel Veiga, Dr.
Empresa Photonita
Avaliador

Dedico este trabalho a toda
Humanidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus do meu coração, de minha compreensão, por toda a força e inteligência para superar as adversidades do trabalho.

Ao meu orientador Armando Albertazzi Gonçalves Júnior e ao meu coorientador Matias Roberto Viotti pela objetividade, imparcialidade e pela paciência com minhas limitações durante a orientação deste trabalho.

Aos financiadores do projeto: CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; ao programa CTPETRO, que através da FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, e do MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia, deram todo o suporte financeiro para a compra de materiais e equipamentos, bolsas de estudos e instrumentos necessários para a concretização deste trabalho.

A meus colegas e amigos do Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automatização que sempre me apoiaram, auxiliaram e incentivaram na realização deste estudo, em especial: Fabio Silva, Luiz Domingos, Danilo Loureiro, Dioni Cantelli, Nicholas Drabowski, David Pedro Willemann, Maryah Haertel e Miguel Burg Demay e Fabricio Broering.

A minha ex-namorada Ana Paula Alves Soares pela paciência durante minhas ausências e pelo apoio nos momentos de grande expectativa.

A toda minha família, que sempre acreditou no meu trabalho e me incentivava a cada dia. Em especial: meu pai Dirceu Aires dos Reis, minha mãe Cleuza Luzia Rodrigues da Costa Reis e minhas tias Cláudia Maria Rodrigues da Costa e Clandira Lúcia Rodrigues da Costa.

Aos meus grandes amigos Osmando Pereira Júnior, Kamila Pereira Lins, Daniel Araújo Caixeta, Lucian Ferreira e Lucas Ferreira de Paula, pela ajuda moral, técnica e intelectual durante estes anos de trabalho e estudo.

Finalmente a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova
idéia jamais voltará ao seu
tamanho original.”*

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho envolve o aprimoramento e a avaliação de alguns aspectos de uma técnica de medição de tensões residuais uniaxiais, combinando a holografia eletrônica (ESPI- *Electronic Speckle Pattern Interferometry*) e a indentação instrumentada. Ao invés de se produzir o alívio de tensões, como na maioria dos métodos de medição de tensões residuais destrutivos e semi-destrutivos, a indentação é usada para introduzir deformações plásticas localizadas no material. O campo de deslocamentos radial resultante ao redor da marca de indentação é medido e, através de um modelo matemático apropriado, o estado de tensões residuais presente na região de interesse é quantificado. São usados os mesmos modelos matemáticos desenvolvidos por Sutério (2005) e um novo dispositivo capaz de aplicar indentação de forma mais controlada, fazendo o controle da carga aplicada ou da penetração obtida. São apresentados o aparato experimental para simulação de tensões residuais, o equipamento de indentação de forma controlada, as formulações analítico-empíricas obtidas através de experimentos controlados, e o programa de computador desenvolvido e usado para quantificar tensões residuais na superfície do material. Uma ampla série de experimentos é realizada para calibrar o sistema usando carregamentos de referência uniaxiais. O material estudado é o aço SAE 1020. Após a calibração, são realizadas verificações a partir de medições independentes. Uma análise das incertezas envolvidas nos sistemas de medição e de simulação de tensões residuais uniaxiais é retomada e avaliada. Finalmente, o trabalho traz ainda comparações com os resultados de Sutério (2005) e aponta os progressos que devem ser realizados para melhorar o desempenho do sistema.

Palavras-chave: tensões residuais. indentação. holografia eletrônica.

ABSTRACT

This work develops a partial evaluation a technique for uniaxial residual stress measurement, combining electronic holography (ESPI- "Electronic Speckle Pattern Interferometry"), and instrumented indentation. Instead of releasing the stress field, as do most of the destructive and semi-destructive methods of measurement of residual stresses, indentation is used to produce new local plastic deformations in the material. The resultant radial displacement field around the indentation print is measured and fitted to an appropriate mathematical model. As the result, the state of residual stresses in the region of interest is quantified. The same mathematical models developed by Suterio (2005) are used here in combination with a new indentation device able to better control indentation parameters as indentation force and indentation penetration. This dissertation presents the experimental apparatus for residual stresses simulation, the controlled indentation equipment, the analytical-empirical formulas obtained from controlled experiments, and the computer program developed and used to quantify residual surface stresses in the material. A long series of experiments are executed and analyzed to calibrate the system using reference uniaxial stresses values. The material studied is the SAE 1020 steel. After calibration, the system performance was independently verified. An uncertainty budget for uniaxial stresses simulation and measurement was resumed and evaluated. Finally, this work presents some comparisons in relation to Suterio's work (2005) and points to further improvements to increase measurement performance of the system.

Keywords: residual stress. indentation. interferometry.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

\vec{p}	Vetor sensibilidade.
\vec{d}	Vetor deslocamento.
OF	Ordem de franja.
α	Constante característica do indentador e do material ou ângulo de incidência do feixe na superfície do objeto [°].
β	Ângulo da direção principal de tensão [°] ou parâmetros calculados pelo método dos mínimos quadrados.
γ	Ângulo entre o eixo do espelho cônico e sua superfície em qualquer secção transversal.
θ	Ângulo em coordenada polar de qualquer dos pontos de deslocamento medidos na região circular de medição ou diferença de fase.
z	Coordenada cilíndrica no eixo z.
$\theta(x,y)$	Diferença de fase entre os feixes A e B no ponto (x,y), ou seja: $\theta(x,y) = \theta_A - \theta_B$
(r,θ)	Coordenadas polares.
σ	Tensão uniaxial [MPa].
ε	Deformação uniaxial [$\mu\text{m}/\text{m}$].
σ_{ref}	Tensão de referência, obtida através de carregamento uniaxial [MPa].
ε_{ref}	Deformação média de referência. [$\mu\text{m}/\text{m}$].
σ_{θ}	Tensão tangencial.
ε_{θ}	Deformação tangencial.
σ_r	Tensão radial.
ε_r	Deformação radial.
σ_{res}	Tensões residuais do material ensaiado.
σ_y	Tensão de escoamento.
σ_1	Tensão uniaxial medida.
$\tau_{r\theta}$	Tensão cisalhante.
$\gamma_{r\theta}$	Deformação angular.
$I(x,y)$	Intensidade do padrão de <i>speckle</i> resultante.
λ	Comprimento de onda do laser [μm].

$\Delta\phi$	Variação de fase entre os estados do objeto deformado e em repouso.
C	Constante que depende da geometria do indentador ou curvatura de indentação.
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young [GPa].
G	Módulo de elasticidade transversal ou módulo de torção [GPa].
ν	Coefficiente de Poisson.
H	Dureza do material.
h	Profundidade da indentação.
K	Coefficiente de resistência plástico.
n	Coefficiente de encruamento ou número de medidas repetidas realizadas no material numa mesma condição de carregamento.
K_1	Constante de indentação relacionada à soma das tensões principais.
K_2 e K_3	Constantes de indentação relacionadas à subtração das tensões principais.
K_4	Constante da carga aplicada de indentação [N].
$\Psi_{1i}, \Psi_{2i}, \Psi_{3i}, \Psi_{4i}$	Coefficientes experimentalmente determinados para a regressão polinomial das constantes de indentação.
P	Carga de indentação.
P_r	Carga residual após o descarregamento.
r	Raio.
r_0	Raio do furo.
$T(\theta)$	Função de θ que representa os deslocamentos de corpo rígido dos pontos medidos.
u	Deslocamento na direção longitudinal ou radial.
v	Deslocamento na direção transversal ou tangencial.

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	23
1.1 HISTÓRICO	24
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS	25
1.2.1 Medição de tensões residuais	25
1.2.2 A holografia eletrônica na medição de tensões residuais	26
1.2.3 A indentação	27
1.3 OBJETIVOS	28
2 TENSÕES RESIDUAIS.....	29
2.1 TIPOS DE TENSÕES RESIDUAIS	29
2.2 EFEITOS DAS TENSÕES RESIDUAIS	31
2.3 MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	32
2.3.1 Métodos destrutivos	33
2.3.2 Métodos não destrutivos	37
2.3.3 Comparações e métodos híbridos	40
3 A INDENTAÇÃO.....	45
3.1 O ESTADO DA ARTE	45
3.2 BASE TEÓRICA DA INDENTAÇÃO	47
3.2.1 Técnica da força pontual	47

3.3	MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS USANDO INDENTAÇÃO	50
4	A HOLOGRAFIA ELETRÔNICA.....	53
4.1	PRINCÍPIOS	53
4.1.1	O <i>speckle</i>	54
4.1.2	As franjas de interferência	56
4.1.3	Deslocamento de fase ou “ <i>Phase-shifting</i> ”	56
4.1.4	Cálculo do deslocamento	58
4.2	PRINCÍPIOS DA INTERFEROMETRIA RADIAL	58
4.2.1	Teoria da óptica difrativa	59
4.3	A ROSETA ÓPTICA DIFRATIVA	62
4.3.1	Óptica de iluminação	63
4.3.2	DOE gerador de iluminação cônica	64
5	O SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	67
5.1	CABEÇOTE DE MEDIÇÃO	67
5.1.1	Transdutores do módulo de indentação	71
5.2	BASE DE FIXAÇÃO	73
5.2.1	Simulador de tensão	76
5.2.2	Material Ensaiado	79
6	O MODELO MATEMÁTICO.....	81
6.1	MODELAMENTO DO MÉTODO DO FURO	84
6.1.1	Furo passante	84
6.1.2	Furo Cego	86
6.2	MODELO ANALÍTICO APROXIMADO PARA A INDENTAÇÃO	87

6.2.1	Modelos derivados do método do furo passante	88
6.2.2	Modelos derivados do método do furo cego	89
6.3	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MATEMÁTICOS E TENSÕES PRINCIPAIS	90
6.3.1	Modelo para regressão linear	91
6.4	SOFTWARES DE CONTROLE E ANÁLISE	92
6.4.1	Programa computacional Indentation	92
6.4.2	Programa computacional STRES	96
7	AValiação EXPERIMENTAL.....	99
7.1	OS MODELOS MATEMÁTICOS DE CÁLCULO	99
7.2	MEDIDAS EM MATERIAS LIVRES DE TENSÕES	100
7.2.1	Modelo “Set_Indent”	100
7.3	MEDIÇÕES COM TENSÃO CONTROLADA	102
7.3.1	Modelos “Set_02Par” e “Set_03Par”	105
7.3.2	Modelos “Set_02Par_Indent” e “Set_03Par_Indent”	109
7.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	114
7.4.1	Determinação das tensões residuais	116
7.4.2	Resumo das medições de tensões residuais uniaxiais	126
8	AValiação E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO.....	129
8.1	FONTES DE INCERTEZA	130
8.2	ANÁLISE METROLÓGICA	131
8.2.1	Avaliação da incerteza combinada	133

8.3	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO	140
9	CONCLUSÕES.....	147
9.1	CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS	147
9.2	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE CÁLCULO	148
9.3	ASPECTOS GERAIS DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO	149
9.4	LIMITAÇÕES ENCONTRADAS	150
	REFERÊNCIAS.....	153

CAPÍTULO 1

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

“A medição de tensões mecânicas *in situ*” é amplamente utilizada na monitoração da confiabilidade operacional de estruturas e de componentes mecânicos” (SUTERIO et al. 2002, p.1). É uma operação de grande importância para o correto gerenciamento e análise de riscos e se torna crítica em aplicações onde o estado de tensões pode ser complexo e intenso.

Em estruturas mecânicas em operação, além dos esforços de serviço, pelo menos quatro fatores geram tensões: o processo de montagem, as tensões de origem térmica, as decorrentes da interação com o ambiente externo e as tensões residuais da fabricação. Sua combinação pode atingir valores próximos e até superiores ao admissível pelo material, e isto pode levar ao colapso silencioso do sistema. Assim, medir as tensões combinadas é importante para:

- monitorar a confiabilidade operacional de estruturas e componente mecânicos;
- analisar riscos;
- avaliar a reabilitação e o desempenho de novas técnicas de projeto, construção e montagem;
- otimizar programas de manutenção de estruturas mecânicas.

Apesar de sua importância, este tipo de medição não é efetuado em campo tanto quanto seria necessário. O desenvolvimento de sistemas de medição práticos e confiáveis é dispendioso e complexo, mas de grande interesse nos setores de petróleo e gás, naval, aeroespacial, dentre outros.

A quantificação de tensões combinadas por métodos analíticos e numéricos é difícil por exigir o conhecimento do histórico de esforços do material. Esta informação é raramente conhecida com rigor suficiente. Na prática, a medição das tensões combinadas pode ser realizada pelos mesmos caminhos que são usados para medir as tensões residuais. Do ponto de vista do sistema de medição não há diferença sobre qual fator originou a tensão medida, seja ela residual ou não. Sua medição revela o valor combinado.

Vários métodos de medição de tensões residuais têm sido desenvolvidos e utilizados por várias décadas. Boa parte destes determinam indiretamente as tensões residuais através dos efeitos que o alívio das tensões residuais provocam sobre o material, normalmente feita por meio de extensômetros de resistência (“*strain gages*”) (SUTERIO et al., 2002, p. 1).

Neste trabalho é visado o aperfeiçoamento, validação em laboratório de uma técnica de medição de tensões residuais que, ao invés de aliviar, induz tensões adicionais. Para isto, é usada uma combinação de um indentador instrumentado e um sensor óptico que mede o campo de deslocamento radial ao redor da indentação por meio de um interferômetro que faz uso da holografia eletrônica.

1.1 HISTÓRICO

Há cerca de 20 anos, o LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC – vem desenvolvendo pesquisas e aplicando a holografia eletrônica, motivado tanto pela percepção do potencial que a técnica oferece, como pelas progressivas conquistas com ela alcançadas.

Um novo tipo de configuração foi criado pela sua equipe, caracterizando um interferômetro radial, o que abriu um espectro de ação inovador dentro do qual o presente trabalho, entre outros, se insere. Esforços foram orientados na direção de colocar à disposição um instrumento para a medição de deformações locais em componentes mecânicos, e que tenha como características a facilidade de utilização, rapidez, e confiabilidade. Este sistema foi denominado de Roseta Óptica, e o desenvolvimento de protótipos foi financiado pelo CTPETRO e apoiado pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás, pelos programas de pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial e em Engenharia Mecânica da UFSC (RODACOSKI, 1997).

Foi concluído em 2005 na UFSC um projeto denominado TENDUTO: Sistemas Ópticos para Medição de Tensões em Dutos, financiado pelo CTPETRO – Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor Petróleo e Gás Natural, através da FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos. Este projeto visava desenvolver meios para aumentar a confiabilidade operacional, monitorar a integridade e efetuar

a análise de risco de dutos metálicos e de materiais compostos, através da medição dos níveis de tensões mecânicas de serviço, tensões residuais e das tensões combinadas presentes (SUTERIO, 2005).

Do ano 2005 até 2007 foi desenvolvido um projeto com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no qual o foco principal foi o desenvolvimento de um elemento óptico difrativo capaz de conferir ao sistema de medição sensibilidade radial e maior robustez em campo.

Do ano 2007 até final de 2010 foi colocado em ação o projeto STRES, com o apoio da FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, do qual aperfeiçoou o sistema modular de medições de tensões residuais e desenvolveu uma nova versão de um sistema usado para medir tensões mecânicas. Neste período foram criados também o atual módulo de indentação, e uma nova base de apoio com fixação mais resistente adaptada para o uso com este indentador.

Este trabalho está situado na continuidade do projeto STRES e visa o aperfeiçoamento da medição de tensões residuais uniaxiais através da indentação instrumentada associada à holografia eletrônica.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

1.2.1 Medição de tensões residuais

Existem várias técnicas e métodos propostos para a medição de tensões residuais, mas poucos são aplicados em campo em estruturas como tubulações, pontes e aeronaves. Estes poucos incluem o método de difração de raios-x (XRD) e o método do furo cego com extensômetros de resistência elétrica.

Alguns métodos são restritos a uso em laboratório, quando o componente a medir as tensões residuais tem que ser trazido até o sistema de medição. Em outros dispositivos portáteis são levados até a estrutura a ser medida. (LU, J., 1996).

A técnica mais empregada para a medição de tensões de serviço é a extensometria. Basicamente utiliza-se de extensômetros de resistência elétrica conhecidos como “*strain gages*”, para medição de deformações superficiais. [...] A informação obtida de um extensômetro é localizada e parcial. O sinal indicado corresponde

ao valor médio das deformações que agem na direção do eixo do extensômetro. Para a plena caracterização do estado de tensões, é necessário o uso de uma roseta - um conjunto formado por pelo menos três extensômetros, com ângulos e posições predefinidas, cujos sinais são usados para caracterizar o estado de tensões médio na região onde foi instalada. (SUTERIO, 2005, p.3,4)

Dentre os principais métodos de medição de tensões residuais, as técnicas de Difração de Raios X e o Método do Furo são os mais utilizados pela sua confiabilidade (ambos normalizados), principalmente quando comparados com métodos mecânicos destrutivos (SUTERIO, 2005, p.14).

Técnicas de indução de tensão, ao invés de alívio de tensão, vêm-se demonstrando como viáveis para a quantificação de tensões residuais, como por exemplo, o método da indentação, que também causa alteração superficial no material. O desenvolvimento desta técnica trará grande benefício por não gerar cavacos, como o que ocorre no método do furo, e maior rapidez na execução da medição (SUTERIO, 2005, p.15).

1.2.2 A holografia eletrônica na medição de tensões residuais

As principais desvantagens da medição de tensões residuais pela técnica do Furo combinada com extensometria são: (a) a necessidade de um trecho de superfície plano, ou quase plano, e liso para colar os extensômetros, (b) cuidadosa preparação da superfície a medir, (c) o custo e o elevado tempo associados com a instalação dos extensômetros, (d) a necessidade do furo ser feito exatamente no centro do extensômetros a fim de evitar erros elevados e (e) a necessidade de um técnico com experiência para realizar todo o procedimento de preparação e medição com sucesso.

Devido a estas dificuldades, as técnicas óticas sem contato estão sendo aplicadas há quase duas décadas para medir o campo de deslocamento ao redor do furo. A combinação do método do Furo com a

instrumentação portátil da holografia eletrônica (frequentemente referida em inglês como ESPI - “*Electronic Speckle Pattern Interferometry*” ou DSPI - “*Digital Speckle Pattern Interferometry*”), tem mostrado grande potencial de substituição do método de extensimetria elétrica. Suas principais vantagens são: (a) elevada sensibilidade para medir deslocamentos muito pequenos, (b) dispensa de materiais de consumo (uso de brocas apenas), (c) custo compatível à instrumentação existente no mercado, e, principalmente, (d) pela redução para um quarto o tempo de medição envolvido (RODACOSKI et al., 1996) (ALBERTAZZI; KANDA; BOETTGER, 1995) (ALBERTAZZI JR., A. G, 1993).

A holografia eletrônica é uma técnica que mede através de imagens das franjas interferométricas resultantes de micro-deslocamentos na superfície da estrutura analisada quando iluminada de forma apropriada pelo laser e digitalmente processadas.

A idéia de se medir deslocamentos através da interferometria óptica não é nova. No entanto, a grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresentam configurações que medem componentes cartesianas do deslocamento. Para aplicações na engenharia é extremamente desejável medir deslocamentos na direção radial através de uma única imagem. Com o inovador advento do interferômetro radial criado por Albertazzi Jr. e sua equipe utilizando espelhos cônicos (ALBERTAZZI JR., 2004) (ALBERTAZZI et al, 2004), e, posteriormente, usando uma grade difrativa (KAPP, 2010) tornou-se mais simples medir a magnitude e a direção dos deslocamentos e estados biaxiais de deformações e tensões.

1.2.3 A indentação

Na literatura são encontradas várias referências sobre a medição de tensões residuais utilizando-se o método do furo cego em conjunto com a extensimetria (DALLY; RILEY, 1991) (WITHERS, 1991a), (WITHERS, 1991b) (LU, 1996). Por outro lado, mostra também ser possível obter informações quantitativas sobre o estado de tensões residuais através da indentação (SUTERIO, 2005) (LEE, Y.; KWON, D., 2004).

Uma indentação ocorre quando um indentedor normalizado com cabeça semi-esférica, cônica ou piramidal, é firmemente pressionado sobre o ponto da superfície do material onde se pretende

medir. “Em torno deste ponto, forma-se uma região plastificada; cuja forma e extensão são influenciadas pelo nível de tensões combinadas que o material apresenta.” (SUTERIO, 2005, p.5).

Um interferômetro radial permite medir a componente radial do campo de deslocamentos ao redor da indentação e, através de um modelo semi-empírico, é possível determinar o estado de tensões que age nesta região (ALBERTAZZI et al, 2000) (VEIGA; ALBERTAZZI JR., 2000). Este foi o caminho seguido em um trabalho realizado em 2005 nesta mesma instituição. Suterio (2005) demonstrou a viabilidade da medição de tensões residuais utilizando um indentador manual associado a um interferômetro radial. Aquele autor concluiu que: (a) com uma calibração apropriada, o método da indentação mostrou ser viável abranger uma faixa de medição entre 20 e 80 % da tensão de escoamento do material (até 60% para o método do furo cego), e (b) a análise das incertezas revelou que, para as condições ensaiadas, foi possível enquadrar o valor medido dentro de uma faixa de incerteza similar às incertezas de outras técnicas de medição de tensões residuais (SUTERIO, 2005).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um método prático, confiável e minimamente invasivo para avaliar em campo a segurança de dutos em uso.

Especificamente, este trabalho visa:

- Revalidar em laboratório, uma técnica de medição de tensões residuais uniaxiais combinando a indentação e a holografia eletrônica para medir a componente radial do campo de deslocamentos em torno da marca de indentação;
- Melhorar os níveis de incerteza dos resultados de medição gerados por esta técnica através do uso de um indentador instrumentado.

CAPÍTULO 2

2 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais podem ser definidas como aquelas que se mantêm em um material, ou corpo, após a manufatura e o processo de fabricação mesmo com a inexistência de forças externas ou gradiente térmico. Tensões residuais também podem ser produzidas por carregamento de serviço, levando a deformação plástica não homogênea em uma parte da estrutura (SHARPE JR; SHARPE, 2008).

As tensões residuais se desenvolvem durante a maioria dos processos de fabricação que envolvem deformações plásticas do material, tratamento térmico, usinagem ou operações de processamento que transformam a geometria ou modifiquem as propriedades de um material. Estas surgem de várias fontes e podem estar presentes em um material bruto não processado, introduzidas durante a fabricação ou aparecem na peça acabada a partir de carregamentos de serviço. As origens das tensões residuais em uma estrutura podem ser classificadas como (SHARPE JR; SHARPE, 2008):

- diferencial de fluxo plástico;
- diferencial de taxas de resfriamento;
- transformações de fase com mudanças de volume etc.

As operações de manufatura, por exemplo, fundição, laminação, estampagem, usinagem, tratamentos térmicos e termo-químicos, soldagem, trefilação, dobramento, entre outras, são os principais processos geradores de tensões residuais em vários graus. Em alguns casos as tensões residuais podem ser introduzidas mais tarde na vida do material ou da peça acabada, durante procedimentos de instalação, montagem, eventuais sobrecargas, ou ainda, por reparos e modificações em serviço (BHADESHIA, 2002).

2.1 TIPOS DE TENSÕES RESIDUAIS

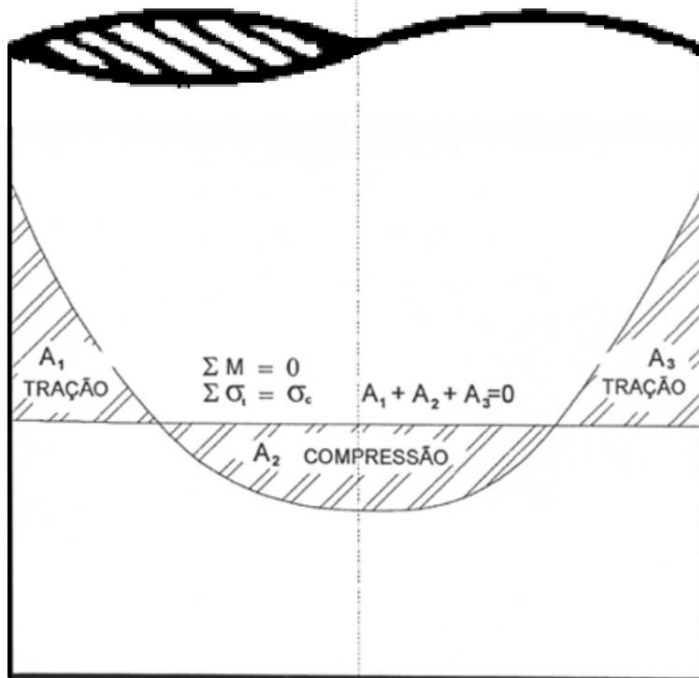
As tensões residuais podem ser classificadas quanto à extensão em três tipos principais: (1) tensões residuais macroscópicas; (2) tensões residuais microscópicas e; (3) tensões residuais submicroscópicas. Tal

classificação é feita de acordo com a distância em que as tensões podem ser observadas (LU, 1996).

O principal tipo de tensões residuais é denominado de tensões residuais macroscópicas. São de longo alcance, se estendendo no mínimo por vários grãos do material. As deformações originadas por elas são praticamente uniformes para alguns grãos. As tensões residuais macroscópicas assumem um estado de equilíbrio, e, qualquer alteração, como a retirada do material ou surgimento de uma nova superfície, exige que as tensões se rearranjem para que uma nova configuração de equilíbrio seja atingida. Tais tensões são quantidades tensoriais, com magnitudes e direções principais que variam em diferentes regiões do material (LU, 1996).

Um padrão típico de tensões residuais macroscópicas normalmente encontrado em peças é apresentado pela figura 2.1:

Figura 2.1: Padrão típico de distribuição de tensões residuais ao longo de uma seção do material. Onde A_1 , A_2 e A_3 = áreas, M = momentos e σ_t = tensões de tração e σ_c = tensões de compressão.



Na figura 2.1 está representada a tensão residual em um eixo onde o valor máximo de tensão, normalmente de tração, ocorre próximo da superfície e diminui à medida que aumenta a profundidade até que, a uma determinada profundidade, o campo de tensão inverte o sinal para satisfazer a condição de equilíbrio das tensões internas.

As tensões residuais microscópicas ou micro-tensões estruturais cobrem uma distância de um grão ou uma parte de grão. Assim, a região de influência no equilíbrio destas tensões se estende a um pequeno número de grãos. Ocorrem pelo simples processo de orientação dos grãos (LU, 1996).

As tensões residuais sub-microscópicas chegam a apenas algumas distâncias atômicas interiores ao grão. São conseqüências de imperfeições da rede cristalina, ocorrendo principalmente em regiões próximas às discordâncias. Estes dois tipos de tensões residuais podem variar de um ponto para outro da rede cristalina (LU, 1996).

2.2 EFEITOS DAS TENSÕES RESIDUAIS

Os efeitos das tensões residuais podem ser tanto benéficos quanto prejudiciais, dependendo do sinal, da intensidade, da distribuição e da relação destes fatores com as características das tensões aplicadas pelo carregamento de serviço, isto é, pelo uso da peça. Normalmente são consideradas tensões indesejadas pela dificuldade em prever sua magnitude e pela característica desfavorável de se combinarem com as demais componentes de tensões, especialmente nas situações que envolvem fadiga (SUTERIO, 2005 apud CORDOVIL, 2001).

As tensões residuais compressivas geralmente possuem um efeito benéfico na vida de fadiga, redução dos efeitos de propagação de trincas ou corrosão sob tensão. Enquanto que tensões residuais trativas, geralmente, reduzem o desempenho do material sob os mesmos efeitos, prejudicando a resistência e vida das estruturas.

A natureza benéfica ou maléfica das tensões residuais está relacionada a três fatores principais: 1) ao tipo de material, ou seja, se ele encrua ou amolece durante deformação plástica cíclica; 2) ao perfil de tensões residuais introduzidos durante o processamento termomecânico e a redistribuição destas tensões residuais que ocorrem durante deformação cíclica; e 3) ao tipo de carregamento que o material

será submetido durante sua utilização (SOARES, 1998 apud WANG et al., 1981; WAGNER, 1981; ZAMRIK, 1988; VIERECK et al., 1991).

Um dos grandes problemas enfrentados na indústria metal-mecânica são as distorções de forma. Estas distorções estão diretamente ligadas às tensões residuais que podem vir a alterar a resposta do componente ou sistema quando em uso ou durante os processos de manufatura. Estas tensões residuais podem inclusive gerar perda de matérias-primas ocasionadas por distorções de forma, quebra de componentes durante tratamentos térmicos e/ou em etapas posteriores do processo de fabricação (NUNES, 2008).

2.3 MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Ao longo das últimas décadas, vários métodos qualitativos e quantitativos de análise de tensões residuais têm sido desenvolvidos. Entretanto, a tensão não pode ser medida diretamente. Medem-se os seus efeitos sobre o material e, com eles, são calculadas as tensões. O que é invariavelmente medido para determinar as tensões residuais são as deformações plásticas e elásticas. Estas são resultantes diretas da tensão residual existente no metal via um método físico, ou a mudança de deformação elástica resultante do alívio de uma parte, ou total, da tensão residual existente por meio de um método mecânico. A tensão que está causando, ou foi causada, pela deformação é então calculada usando as constantes elásticas aplicáveis para o metal (MACKENZIE; TOTTEN, 2006)

Geralmente, é feita uma distinção entre técnicas não-destrutivas, semidestrutivas e destrutivas para a medição de tensões residuais (SHARPE, 2008)

Os métodos semidestrutivos e destrutivos se baseiam na alteração do estado de equilíbrio das tensões residuais causada por modificações geométricas, provocando alívio destas tensões no ponto ou na região de medição. São semidestrutivas aquelas técnicas que introduzem algum dano na região medida do equipamento, porém não comprometem sua integridade ou sua operação. As deformações causadas pelo alívio são medidas e, através de modelos matemáticos adequados, são determinadas as tensões residuais. Nestes dois tipos de métodos somente são analisadas as tensões residuais macroscópicas.

Os métodos não-destrutivos são baseados nas variações de parâmetros físicos ou cristalográficos do material em análise,

relacionados com as tensões residuais que provocam estas alterações. Estes métodos determinam de forma combinada todas as tensões residuais existentes no material, sejam elas microscópicas, sub-microscópicas ou macroscópicas, sem a possibilidade de distinção entre elas.

A seguir são apresentados os principais métodos de medição de tensões residuais macroscópicas e suas características mais importantes, dando um enfoque maior aos procedimentos semidestrutivos em vista de sua relação com este trabalho.

2.3.1 Métodos destrutivos

Métodos destrutivos são fundamentalmente procedimentos de alívio de tensão geralmente decorrentes de modificações geométricas. Isto quer dizer que a informação é obtida por alívio de tensões residuais em um elemento de volume finito e medindo a mudança de deformação resultante. Esta é então usada juntamente com suposições aplicáveis sobre a natureza do campo de tensões, reconstruindo o campo original de tensões. Estas suposições incluem a magnitude e gradientes no campo de tensões e se é suficiente assumir se os gradientes são uni-, bi- ou tridimensional.

2.3.1.1 *Técnica da remoção de camadas ou da deflexão*

Em sua variação mais conhecida, o método consiste nas medições das deflexões de um corpo após sucessivas remoções de camadas do material avaliado. A técnica é baseada no princípio de que a deflexão varia após a retirada de uma camada de material tensionado (que é feita normalmente por usinagem química). Isto ocorre porque o material busca uma nova posição de equilíbrio estático para os esforços internos gerados pelas tensões que nele atuam (ALBERTAZZI JR., 1997).

2.3.1.2 *Técnicas de seccionamento*

As técnicas de seccionamento têm como princípio a aplicação de cortes para a criação de novas superfícies livres, para promover a redistribuição das tensões residuais existentes na região seccionada da peça e então possibilitar sua determinação (ALBERTAZZI JR., 1997.)

Algumas técnicas de seccionamento foram desenvolvidas exclusivamente para avaliar peças cilíndricas e anelares. Através de cortes radiais em anéis (que podem ser partes de tubos), pode-se determinar visualmente se ali estão contidas tensões residuais circunferenciais compressivas ou trativas, respectivamente, dependendo do fechamento ou abertura do anel.

O uso de extensômetros para medir as deformações geradas pelos cortes permite fazer uma análise quantitativa das tensões residuais atuantes no corpo de prova.

2.3.2 Métodos semidestrutivos

Entre os métodos não destrutivos, que não afetam a funcionalidade ou reduzem a resistência e outras propriedades do componente; e as técnicas destrutivas, que têm um efeito severo nestes aspectos, estão os métodos semidestrutivos. Estes são procedimentos que têm pouco ou desprezível efeito nos componentes onde são medidas as tensões residuais, ou métodos dos quais o componente pode ser reparado após a medição.

As técnicas consideradas semidestrutivas são aquelas que requerem pequenos furos ou anéis a serem feitos no componente; ou indentações a serem feitas na superfície.

2.3.2.1 *Técnica do furo cego*

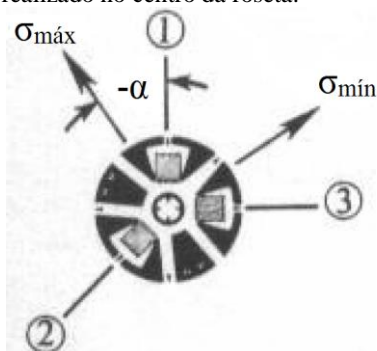
A técnica do furo cego é uma das mais utilizadas na medição de tensões residuais, por ser de fácil aplicação na maior parte dos casos, ter uma relação custo-exatidão adequada, e por ter seus procedimentos de medição e tratamento de resultados normalizados.

É uma técnica que produz o alívio de tensões pela execução de um furo cego (diâmetro entre 0,8 mm e 3,2 mm) e o monitoramento das deformações nas regiões vizinhas ao furo. A solução analítica deste problema foi desenvolvida por Kirsch em 1898, sendo que o trabalho pioneiro sobre medições de tensões residuais pelo método do furo foi proposto por J. Mathar em 1934 (DALLY, 1991) (LU, 1996) (KOBAYASHI, 2003). Atualmente este método é normalizado pela ASTM-E-837 08e1- 2008 - "*Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*" (American Society for Testing and Materials, 2008).

Extensômetros colados próximos à região onde será usinado o furo medem as mudanças nas deformações radiais provocadas pelas tensões aliviadas devido a usinagem do furo. Através de constantes de calibração, estas deformações são relacionadas às tensões residuais existentes no material antes da usinagem. No caso de campos de tensões residuais uniformemente distribuídas na espessura do material, as constantes de calibração já foram estabelecidas por procedimentos experimentais e/ou numéricos (SOARES, 2003, p. 57).

A figura 2.2 mostra um extensômetro do tipo roseta usado na técnica do furo cego:

Figura 2.2: Roseta extensiométrica usada na medição de tensões residuais através do método do furo cego: 1, 2 e 3 são os extensômetros e o furo é realizado no centro da roseta.



Fonte: Vieira et al. (2002, p. 5).

Diversos estudos tornaram esta técnica uma das mais confiáveis para a determinação de tensões residuais. Destacam-se vários estudos teóricos, experimentais e numéricos, como os de Schajer (1981, 1988 e 1993), que contribuiu com estudos de elementos finitos no cálculo de tensões, procedimento de cálculo de tensões não-uniformes e uso de outros métodos de cálculo, como o método integral (SUTERIO, 2005 apud SCHAJER, 1981; SCHAJER, 1988a; SCHAJER, 1988b; SCHAJER, 1993)

2.3.2.2 *Técnica da indentação*

Por mais de seis décadas, engenheiros e cientistas propuseram o uso de indentadores, daqueles usados em ensaios de dureza, como meio de medir ou detectar tensões residuais superficiais. Kokubo (1932) relatou que tensões aplicadas sob carregamento de flexão modificavam a dureza Vickers aparente em aço carbono laminado e recozido. Ele mostrou que tensões de tração tendiam a diminuir a dureza aparente e tensões de compressão o contrário (MACKENZIE; TOTTEN, 2006).

Duas décadas depois, Sines e Carlson (1952) propuseram um método que requeria uma grande quantidade de carregamentos externos a serem aplicados ao componente onde as tensões residuais eram avaliadas enquanto medições de dureza eram feitas. As cargas eram aplicadas para causar tração e compressão. O sinal da tensão era então revelado pela comparação de efeito na tensão aplicada na medição de dureza (MACKENZIE; TOTTEN, 2006).

[Por volta de 1950], POMEY et al propôs que as tensões residuais podiam ser medidas por um penetrador esférico pressionado no componente utilizando uma relação entre a carga de pressão enquanto crescente, e a resistência elétrica da interface entre a penetração e o componente. Ele defendia que um pequeno decréscimo na resistência elétrica indicava que porções do material abaixo da esfera estava escoando plasticamente e a correspondente carga da indentação podia ser relacionada a tensão residual existente (MACKENZIE; TOTTEN,

2006 apud POMEY; GORATEL; ABEL, 1950, tradução nossa).

Mais tarde, Chiang et al. forneceu uma crítica a várias análises de indentações existentes e propôs uma interpretação para indentações exibindo plasticidade hemisférica. Porém, as aplicações ilustradas naquele artigo estavam focadas em materiais frágeis e não em metais dúcteis. Atualmente, existem numerosos documentos publicados propondo várias aproximações para interpretar as cargas e formas da indentação bem como estimar o campo de tensões residuais nas regiões superficiais e sub-superficiais dos materiais (MACKENZIE; TOTTEN, 2006, p. 459, tradução nossa).

2.3.3 Métodos não destrutivos

Os métodos para medição de deformação descritos nas seções anteriores medem a mudança em dimensões ou deformações do componente produzido pela remoção ou deslocamento de um volume finito de metal tensionado deste componente. Desta forma, estes medem a deformação induzida pela remoção de material e também pela perturbação do campo de tensões residuais. Por outro lado, os procedimentos não destrutivos medem a dimensão da rede cristalina do metal ou algum parâmetro físico afetado pela dimensão da rede cristalina e assim, estão relacionados a métodos físicos. Uma vez aplicada uma força mecânica, resultando em tensão inferior ao limite de escoamento, em um componente de metal, este se deforma elasto-plasticamente. Esta deformação resulta em uma mudança na dimensão da rede atômica e esta dimensão, ou sua mudança, é que é medida por procedimento de medição não destrutivo.

2.3.3.1 Técnica da difração de raios-X

Esta técnica tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes de

raios-x. Esta grandeza é medida através da posição angular da linha de difração. Num material policristalino, com granulometria fina e isento de tensões residuais, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes. Portanto, se o ângulo de difração para um material livre de tensões residuais for conhecido, pode-se calcular a deformação da rede cristalina da peça em análise (LU, 1996).

O método de difração de raios-x é utilizado na determinação de campos de tensões em camadas com espessuras em torno de 5 μm . Quando aplicado em conjunto com uma técnica de decapagem química possibilita que profundidades de 0,1mm ou mais possam ser analisadas. Esta técnica é normalizada pela SAE-J784a (CORDOVIL, 2001).

As limitações do método de difração de raios-x estão intimamente atreladas a parâmetros metalúrgicos como as impurezas e vazios que são muitas vezes impossíveis de serem detectados para que correções possam ser feitas, e o tamanho de grão (LU, 1996). Uma das limitações mais severas é a pequena capacidade de penetração e a grande absorção desta radiação pelo material, permitindo pequenas medições superficiais (poucas centenas de Angstroms).

A determinação de medidas de tensões ao longo da espessura do material por esta técnica implica na remoção de metal da superfície do material sendo neste caso considerado um método destrutivo. É importante para a confiabilidade dos resultados que o material medido tenha uma granulometria refinada, comportamento linear elástico, seja homogêneo e isotrópico, e não possua gradientes de tensão na região analisada.

Esta técnica não destrutiva tem sido predominantemente restrita a laboratórios devido à limitada portabilidade dos equipamentos de escaneamento XRD, mas a instrumentação para levá-la para o campo e para a área de manufatura tem avançado rapidamente nas últimas duas décadas, principalmente em sentido do aumento de portabilidade, compatibilidade e velocidade de medição.

2.3.3.2 *Técnica da difração de nêutrons*

O método de medição de tensões por difração de raios nêutrons tem o mesmo princípio do método de difração de raios-X. O método se baseia na variação das distâncias entre planos cristalinos e sua correlação com as tensões atuantes no material. A capacidade de

penetração dos nêutrons é muito maior do que a dos raios-X, o que permite a análise de porções maiores (LU, 1996).

O método da difração de nêutrons é um método não destrutivo. Devido ao alto poder de penetração dos nêutrons, permite realizar medidas de tensões residuais em materiais de grande espessura (20x10 m em aços), o que toma o método superior ao de difração de raios x para medidas de deformação interna. Entretanto, definitivamente não é um equipamento portátil, que possa ser levado a campo (SOARES, 1998, p. 28).

Esta técnica tem sido usada para avaliar tensões residuais em soldas, barras laminadas, chapas plasticamente deformadas (HAYASKI et AL., 1997), caixas de foguete forjadas (ROOT;HOSBAUS; HOLDEN, 1991) e vários outros tipos de componentes.

2.3.3.3 *Método ultrassônico*

O princípio por trás da medição de tensão, e também de deformação elástica por técnicas ultrassônicas (acústicas), é o fenômeno de mudança quase linear da velocidade ultrassônica com a tensão aplicada. A tensão é medida por indução de uma onda sonora na frequência de vários MHz dentro do material do espécime e medindo o tempo de repercussão ou outros parâmetros relacionados à velocidade.

Uma vez que várias outras características dos metais, além de deformação elástica induzida por tensão, afetam a velocidade, este efeito deve ser quantificado. Infelizmente nem a tecnologia nem tal conhecimento fundamental é normalmente conhecido.

A maior vantagem das técnicas ultrassônicas para medição de tensão residual reside na promessa de medições tridimensionais não destrutivas no interior do material (MACKENZIE; TOTTEN, 2006).

2.3.3.4 Método magnético

A técnica de análise do ruído Barkhausen (BNA), também conhecida como método magnético, está ligada à medição do número e magnitude das bruscas reorientações magnéticas causadas pela expansão e contração dos domínios magnéticos em um metal ferromagnético. Estas reorientações são observadas como pulsos aleatórios em amplitude, duração, e separação temporal, e assim, são grosseiramente descritas como ruídos (TOTTEN; HOWES; INOUE, 2002).

A aplicação de um campo magnético ou de tensões mecânicas provoca um rearranjo na orientação magnética dos domínios. Este rearranjo acontece de forma que, à medida que o material assume uma magnetização, as regiões se unem formando áreas maiores de mesma orientação magnética. Este crescimento da área igualmente orientada magneticamente ocorre de forma incremental e rápida, gerando o que é conhecido por “Ruído de Barkhausen”. A técnica tem como princípio a medição da amplitude desses ruídos.

A medição de tensões residuais com este método é baseada em curvas de calibração obtidas através da aplicação de tensões conhecidas em corpos de prova, que não precisam necessariamente estar livres de tensões, contanto que o limite elástico do material não seja excedido, o que impossibilita a separação entre as tensões aplicadas e as pré-existentes. Existem dois tipos de curvas de calibração para o método, sendo uma para estados uniaxiais e outra para estados biaxiais.

A principal aplicação do método de Barkhausen é em indicações qualitativas, pois em análises quantitativas, se as características do material medido não forem muito bem conhecidas, os resultados podem ser muito ruins quando comparados com os métodos de raios-x e do furo (LU, 1996).

2.3.4 Comparações e métodos híbridos

Resumidamente, uma técnica de medição de tensões residuais é escolhida de acordo com a natureza da parte a ser analisada e do tipo de medição a ser realizada. Estes parâmetros incluem o seguinte:

- (1) natureza do material: estrutura cristalográfica, textura, composição química e fase;
- (2) o tipo de tensões residuais (macro-tensão e/ou micro-tensão);
- (3) o gradiente de tensões residuais na parte analisada (gradiente através da espessura ou ao longo da superfície);
- (4) a geometria e a região da parte analisada (profundidade, dimensão e forma da superfície);
- (5) onde a medida é realizada (em campo ou em laboratório).
- (6) o tipo de intervenção (destrutiva ou não-destrutiva);
- (7) o tempo da intervenção;
- (8) a incerteza e a repetitividade do método;
- (9) o custo da medição e dos equipamentos necessários (SUTERIO, 2005, p. 14).

Somente os métodos destrutivos de alívio de tensões, a técnica semi-destrutiva do furo cego, ou o procedimento não-destrutivo de difração de raios-x ou de nêutrons, são métodos de medição de tensões residuais hoje aceitos e geralmente confiáveis sobre uma banda larga de ligas apresentando campos de tensões induzidos por vários processos de manufatura (MACKENZIE; TOTTEN, 2006).

O método do furo apresenta a vantagem de envolver instrumentação portátil e de baixo custo. Apresenta também a limitação de ser aplicável em estruturas onde o furo executado não afete o seu funcionamento. Por outro lado, a técnica de difração de raios X é reconhecida pela sua natureza não-destrutiva pelo equipamento ter custo elevado, pouca penetração no material e portabilidade limitada.

A associação de métodos já existentes com outras técnicas de medição, vem se destacando nos últimos anos (HUNG; LONG; WANG, 1997) (WU; QIN, 1995) (MACDONACH et al., 1983). Segundo Wu (1995), desde 1984, a “sherografia” interferométrica (*shearing speckle interferometry*), tem sido combinada com o método do furo, e a partir de 1988 tem sido utilizada como um meio rápido para detecção de tensões residuais. A partir de 1991 a “sherografia eletrônica” tem sido utilizada para medição de tensões residuais.

Pesquisas envolvendo a Interferometria de moiré na medição de tensões residuais também estão presentes. O moiré Interferométrico é um método óptico que fornece em tempo real uma cartografia de todo o campo de deslocamentos no plano. A utilização da Interferometria de moiré, conjugada com o método do furo foi relatada pela primeira vez por MacDonach (1983). A aplicação da Interferometria de moiré para a medição de tensões residuais não uniformes em profundidade foi extensamente aplicada por Zhu (1997, 1998a, 1998b, 1998c), Lu (1997, 1998a, 1998b, 2006), Bulhak (2001) e Min (2006). Eles aplicaram este método associado à técnica do furo, e na maioria dos casos estudados utilizaram o método integral (RIBEIRO, 2006).

Comparando com outros métodos, o método de Interferometria de moiré, aplicado à técnica do furo, apresenta vantagens como: (1) a deformação da superfície livre pode ser permanentemente registrada, e (2) a elevada sensibilidade deste método permite estudar a distribuição das tensões residuais em profundidade. O moiré Interferométrico permite aceder aos deslocamentos no plano e quando combinado com o interferômetro Twyman-Green, pode ser obtido todo o campo de deslocamentos, isto é, a três dimensões. Esta característica do método permite tratar também os problemas de tensões residuais não uniformes no plano (RIBEIRO, 2006, p. 28).

A interferometria holográfica é um importante método para a medição de deslocamento ao redor de um furo. Uma variante moderna, a holografia eletrônica (*Electronic Speckle Pattern Interferometry* -ESPI) se tornou popular devido ao uso de uma câmera de vídeo permitir a produção de um padrão de franjas “ao vivo” por subtração de imagens (FURGIUELE; PAGNOTTA; POGGIALINI, 1991) (STEINZIG; PONSLET, 2003) (DÍAZ; KAUFMANN; MÖLLER, 2001). Uma característica importante da holografia eletrônica é que esta funciona com uma superfície plana do espécime, sem a acoplagem da grade de difração necessária nas medições de moiré interferométrico. Estudos apontam o método do furo cego associado à instrumentação portátil da holografia eletrônica, como grande potencial na substituição do método baseado na extensometria elétrica (ALBERTAZZI; KANDA; BOETTGER, 1995) (LIN; HSIEH; HU, 1994) (MAKINO; NELSON, 1994).

As vantagens da holografia eletrônica associada ao método do furo são: portabilidade, praticidade, robustez, grande sensibilidade na medição da componente radial do campo de deslocamento na região de interesse, não usa consumíveis caros, e custos compatíveis à instrumentação existente no mercado. Esta técnica vem sendo estudada desde o início da década de 90 pelos pesquisadores da UFSC, tais como: Albertazzi Jr. et al. (1993, 2000a, 2000b), Rodacoski (1997), Veiga (2000, 2003), Willemann (2002) e Suterio et al. (2002, 2003a, 2003b, 2003c, 2004, 2005).

Correlação digital de imagem (*digital image correlation* -DIC) é outra técnica óptica que pode ser usada para medições de tensões residuais em conjunto com o método do furo (MCGINNIS; PESSIKI; TURKER, 2005) (NELSON; MAKINO; SCHMIDT, 2006). Esta técnica envolve a pintura de um padrão texturizado na superfície do espécime e a captação da imagem da região de interesse usando uma câmera de alta resolução. Esta, colocada perpendicular à superfície, grava imagens antes e depois da deformação. Os detalhes locais das imagens são então matematicamente correlacionados e seus deslocamentos relativos determinados. Porém, sua sensibilidade limitada não é apropriada para medição de tensões residuais em metais. (SCHAJER, 2010).

Métodos que envolvem outras formas de alívio, como no caso de aquecimento localizado, também associados à holografia eletrônica, vêm sendo fruto de pesquisas nos últimos anos (PECHERSKY; ESTOCHEN; VIKRAN, 1999, 2001) (SUTERIO et al., 2002) (VIOTTI et al., 2003, 2004).

Por outro lado, técnicas de indução de tensão, como é o caso da indentação associada à holografia eletrônica, têm demonstrado seu potencial para a avaliação de tensões residuais (RODACOSKI, 1997) (SUTERIO, 2002, 2005) (UNDERWOOD, 1973) (SUTERIO, 2005) (BRUNO; SCIUMÈ, 2003). Suterio (2005), utilizando um interferômetro radial e um aparato para indentação manual controlada por impacto, desenvolveu um modelo matemático analítico-empírico para a medição de tensões residuais ao redor de indentações cônicas e esféricas em aço. Este trabalho mostrou ser possível atingir uma faixa de medição entre 20 e 80 % da tensão de escoamento do material, com níveis de incerteza padrão em torno de 13%. O aprimoramento deste método trará maior confiabilidade, menor tempo de medição e maior praticidade de operação.

Por fim, observa-se uma grande tendência na associação dos principais métodos de medição de deformação. Esta relação aproveita a especificidade e os pontos positivos de cada técnica, melhorando os níveis de incerteza e diminuindo os custos e o tempo de medição.

CAPÍTULO 3

3 A INDENTAÇÃO

A indentação induz novas tensões provocando uma alteração plástica localizada na superfície do material. O campo de deformações locais decorrentes da indentação é função da forma da ferramenta de indentação, das propriedades do material, da carga de indentação e da magnitude e direção das tensões residuais inicialmente presentes no material.

A técnica de indentação instrumentada permite realizar a penetração com a medição simultânea da força aplicada e da profundidade de penetração no material, permitindo a avaliação da resposta do material em função do tempo.

3.1 O ESTADO DA ARTE

Segundo Odo (2001), em função do desenvolvimento e da inovação tecnológica, os ensaios de dureza são divididos em três categorias: (1) nano indentação ou nano dureza, (2) micro indentação ou micro dureza, e (3) macro indentação ou macro dureza.

As escalas de durezas se distinguem pela intensidade da força aplicada e pelo tamanho da área deformada. Inicialmente foram desenvolvidos ensaios de dureza com forças variando de 100 N a 30 kN, e a área avaliada por meios ópticos. As mais conhecidas são: Brinell, Vickers e Rockwell (CALLISTER, 1997) (DOWLING, 1993). Com a necessidade de estudar materiais em micro volumes, caso de materiais frágeis, componentes de superfícies tratadas, micro estruturas, ou filmes finos, surgiu o desenvolvimento de ensaios de micro durezas. Atualmente estes ensaios envolvem forças de 0,1N, e as medidas das deformações são avaliadas

através de microscópios ópticos. Os ensaios mais conhecidos são: Vickers e Knoop (SUTERIO, 2005 apud ELMUSTAFA; STONE, 2002; ODO, 2001; p.17).

Os ensaios de nano durezas surgiram a partir da década de 90 (ODO, 2001), chegando a alguns nanonewtons de força e penetrações da ordem de alguns nanômetros. Nestes sistemas instrumentados, o deslocamento do indentador é monitorado durante todo o ensaio, proporcionando mais informações do que a visualização da impressão. Este método tem grande aplicação em determinar as propriedades mecânicas (dureza e módulo de elasticidade) de filmes finos, materiais com superfícies modificadas e revestimentos.

O método da indentação, em função de sua praticidade e portabilidade, principalmente, se destaca nas seguintes áreas de pesquisa (SUTERIO, 2005):

- Determinação de propriedades elasto-plásticas;
- Avaliação de tensões residuais;
- Quantificação de resistência à fratura;
- Determinação de dureza;
- Caracterização de materiais porosos;

Há três formas conhecidas para indentar um material (SUTERIO, 2005):

- **carga controlada:** utilizada na medição de dureza, tensões residuais e extração das propriedades elasto-plásticas dos materiais;
- **deslocamento controlado:** utilizada para medições de tensões residuais desde que se conheça as propriedades elásticas do material;
- **impulso controlado ou impacto:** mais utilizada na medição de dureza e recentemente na caracterização de propriedades elasto-plásticas.

Três abordagens têm sido usadas para descrever o mecanismo da indentação e também para extração das propriedades do material através da indentação (SUTERIO, 2005):

- **técnica da profundidade-força:** avalia o progresso da profundidade da indentação em função da carga aplicada (curva P-h);
- **técnica da energia:** fornece uma medição da componente de energia elástica e plástica de deformação abaixo da curva de

profundidade da indentação em função da carga aplicada (curva P-h);

- **técnica da força pontual:** analisa a evolução de tensões e deslocamentos devido à força e a profundidade de indentação.

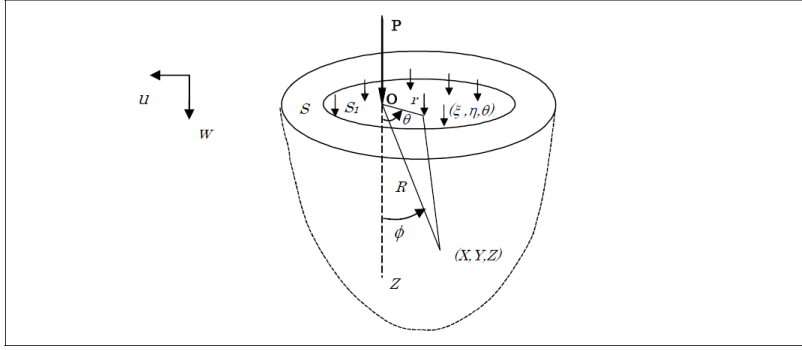
3.2 BASE TEÓRICA DA INDENTAÇÃO

A descrição matemática do campo de tensões devido a uma indentação começa com a análise da condição de um ponto de contato. Este assunto foi estudado por Boussinesq (1885) e Love (1927). A chamada solução de Boussinesq para um ponto de contato permite que a distribuição de tensão seja determinada por qualquer distribuição de pressão dentro de uma área de contato pelo princípio da superposição. Qualquer configuração de contato, como uma indentação esférica, pode ser modelada como uma distribuição apropriada de cargas pontuais de intensidade variada sobre a superfície do espécime, e a distribuição de tensão em seu interior é dada pela superposição do campo de tensões decorrente da indentação de cada carga pontual (FISCHER-CRIPPS, 2004).

3.2.1 Técnica da força pontual

A figura 3.1 esquematiza a solução dada por Boussinesq (1885). O problema de uma carga concentrada normal ao contorno de um sólido foi demonstrado através da solução de deslocamento em termos das funções potenciais de Papkovitch-Neuber (SUTERIO, 2005).

Figura 3.1: Distribuição de forças no contorno de um entalhe semicircular em um sólido semi-infinito.



Fonte: Suterio (2005, p. 22).

A solução elástica em coordenadas cilíndricas para as componentes de deslocamento e tensão pode ser expressa assim (SUTERIO, 2005):

Campo de deslocamentos:

$$R^2 = r^2 + z^2 \quad u_r = \frac{Pr(1+\vartheta)}{2\pi ER} \left[\frac{z}{R^2} - \frac{1-2\vartheta}{R+z} \right] \quad (3.1)$$

$$u_\theta = 0 \quad u_r = \frac{Pr(1+\vartheta)}{2\pi ER} \left[2(1-\vartheta) + \frac{z^2}{R^2} \right]$$

Campo de tensão:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left[-\frac{3r^2 z}{R^5} + \frac{1-2\vartheta}{R(R+z)} \right] \quad \sigma_\theta = \frac{P(1-2\vartheta)}{2\pi} \left[-\frac{1}{R(R+z)} + \frac{z}{R^3} \right] \quad (3.2)$$

$$\sigma_z = -\frac{P}{2\pi} \frac{3z^3}{R^5} \quad \tau_{rz} = -\frac{P}{2\pi} \frac{3z^2}{R^5}$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad \tau_{\theta z} = 0$$

Fazendo-se o equacionamento para a superfície do corpo, as equações 3.1 e 3.2 ficam da seguinte forma (SUTERIO, 2005):

Deslocamentos

$$\begin{aligned} R = r \quad z = 0 \quad u_\theta = 0 \\ u_r = \frac{P(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{2\pi ER} \left(\frac{1}{r} \right) \quad u_z = \frac{P(1+\vartheta)(1-\vartheta)}{\pi E} \left(\frac{1}{r} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Campo de tensões:

$$\begin{aligned} \sigma_r = \frac{P(1-2\vartheta)}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2} \right) \quad \sigma_\theta = -\frac{P(1-2\vartheta)}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2} \right) \\ \sigma_z = 0 \quad \tau_{rz} = 0 \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \tau_{\theta z} = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Como verificado por SUTERIO et al. (2005) a equação do deslocamento radial apresentado por Boussinesq (1885) (equação 3.3), não representa bem o campo de deslocamentos radiais nas vizinhanças da marca de indentação de uma superfície.

Giannakopoulos e Suresh (1997) apresentam de forma analítica a distribuição da tensão radial num problema de força pontual sobre um material. Resumidamente, em coordenadas esféricas ($\mathbf{r}, \varphi, \theta$) os campos de deslocamentos são definidos como (SUTERIO, 2005):

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{C}{E_0} \frac{\vartheta}{(\vartheta - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\vartheta}-1}} \cos(\varphi) \\ u_\varphi &= \frac{C}{E_0} \frac{\vartheta^2}{(\vartheta - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\vartheta}-1}} \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (3.5)$$

, onde:

C é função da força pontual ;

$E = E_0$ zk (E_0 é o módulo de elasticidade na superfície do material e k é uma função do coeficiente de Poisson).

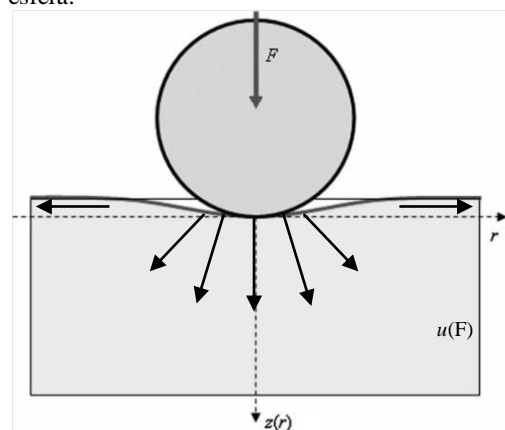
Assim como fez Suterio (2005) são utilizadas neste trabalho as equações apresentadas por Giannakopoulos e Suresh (1997) (equações 3.5), como adição no modelo proposto para quantificação das tensões

residuais. Esta combinação matemática com o método do furo pode ser vista no capítulo 6.

3.3 MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS USANDO INDENTAÇÃO

Como descrito anteriormente, a indentação impõe deslocamentos radiais na superfície do corpo indentado. Esta característica foi observada através de métodos ópticos por diversos autores como: Underwood (1973), HUNG et al. (1997), SUTERIO *et al.* (2002) e por Bruno (2003). A figura 3.2 ilustra simplificada o fenômeno do deslocamento radial em corte para uma amostra indentada:

Figura 3.2: Direção do deslocamento radial em um material indentado por uma esfera.



Fonte: Li e Gu (2009, p. 456).

S. Carlsson e Larsson (2001a, 2001b) fizeram uma análise teórica e experimental associadas a simulações numéricas, e mostraram que as tensões residuais estão relacionadas ao tamanho da área de contato entre o indentador e o material, e que campos de deformação residuais podem ser precisamente correlacionados pelo valor de dureza do material.

Pane e Blank (2005) caracterizaram as respostas superficiais e sub-superficiais, em indentações sem atrito de sólidos elasto-plásticos, em diferentes regimes plásticos, comparando-os com estimativas obtidas

de soluções analíticas. Assim, foi mostrado que o papel dos parâmetros de plasticidade no comportamento da indentação depende das respostas superficial e subsuperficial relacionadas entre si.

Yan, Karlsson e Chen (2005) apresentaram um método unificado de avaliação da indentação instrumentada em materiais com encruamento sob escoamento e sujeito a tensões residuais equi-biaxiais. Baseado em análise reversa, o método pode ser usado para determinar duas variáveis desconhecidas como o limite de escoamento e o encruamento do material.

Feng et al. (2006) propuseram uma expressão analítica para descrever a distribuição de tensões externas à zona plástica devida ao redor de uma indentação. Este modelo foi validado através de simulações numéricas, obtendo resultados excelentes

Tendo em vista numerosas obras publicadas podem-se distinguir quatro formas conhecidas para relacionar as tensões residuais utilizando-se variáveis devidas à indentação: (1) variação de dureza no material, (2) relação entre força e a profundidade de indentação, (3) medição da forma geométrica da indentação, (4) medição da deformação ao redor da indentação. Como já descrito até aqui, este trabalho se enquadra nesta última categoria, limitando-se somente a descrição desta.

A medição da deformação ao redor da indentação consiste na medição do campo de deformações, ou de deslocamentos, ao redor da indentação. Apresenta-se como o mais indicado para a análise quantitativa. Até o momento não foi encontrado na literatura um estudo que aponte um modelo matemático analítico apropriado, simples e de fácil implementação. A sensibilidade deste método é maior quanto maior for o diâmetro da esfera e quanto maior a força de indentação. Tem como grande vantagem determinar o sinal e a direção das tensões residuais presentes na superfície da peça. Por outro lado, tem como desvantagens as dificuldades em quantificar o valor de tensões residuais e a necessidade de se conhecer as propriedades mecânicas do material da peça a ser medida (SUTERIO, 2005, p. 28).

No capítulo 6 é mostrado o método para quantificar as tensões residuais do material a partir da medição do campo de deslocamentos radiais ou deformações ao redor da indentação.

CAPÍTULO 4

4 A HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

A holografia eletrônica ou ESPI ("*Electronic Speckle Pattern Interferometry*") tem sido aplicada como ferramenta na pesquisa e desenvolvimento na medição de micro-deslocamentos, de deformações e tensões na medição de geometrias e na detecção de defeitos, e desde a década de 90, em análise de escoamento de gás (JACQUOT; FOURNIER, 2000).

A holografia eletrônica é a técnica utilizada neste trabalho para a medição do campo de deslocamentos ao redor de uma indentação na superfície do material. Esta técnica utiliza-se da luz de um laser para formar franjas de interferência e, com o uso de técnicas de processamento de imagens, o campo de deslocamentos radiais na superfície do material é quantificado em toda a região iluminada e visível.

Aplicações que utilizam o *speckle* para medições de deslocamento cresceram no final da década de 60 e no começo dos anos 70, geralmente como alternativa à holografia interferométrica. A partir de 1971 começou a ser usada a detecção eletrônica na interferometria *speckle* (GOODMAN, 2007), e se acelerou desde então na medida dos saltos da tecnologia de detecção, principalmente na década de 80 com o aumento do poder de gravação e processamento de imagens digitais e, graças ao desenvolvimento de câmeras CCD, placas de aquisição digitais e microcomputadores (JACQUOT; FOURNIER, 2000).

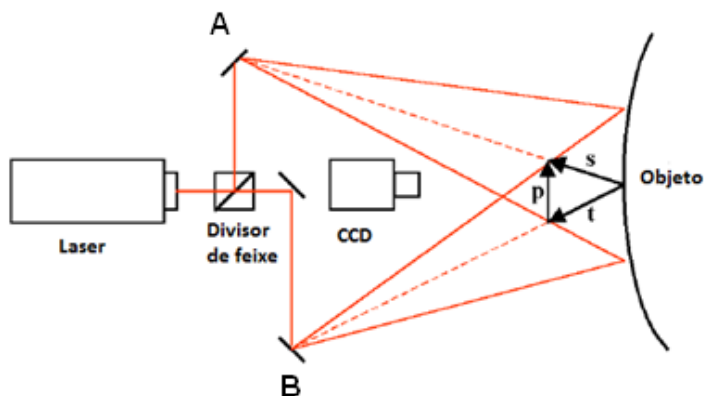
Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre a holografia eletrônica. Trabalhos mais abrangentes sobre a holografia eletrônica, também realizados na UFSC, podem ser de interesse, tais como: Boetgger (1998), Borges (2000), Kapp (1997, 2010), Rodacoski (1997), Suterio (2005), VEIGA (2003).

4.1 PRINCÍPIOS

Uma configuração básica para medição de deslocamento no plano por holografia eletrônica é composta de iluminação dupla. Na figura 4.1 o feixe de laser é dividido em dois através de um espelho

parcial (divisor de feixes). Os dois feixes de luz são direcionados para o objeto através dos espelhos **A** e **B**, de forma que a superfície do objeto seja simultaneamente iluminada por ambos os feixes, e, ao mesmo tempo, visualizada por uma câmera (CCD). Esta capta o padrão de interferência da superfície rugosa do objeto, denominado por “*speckle*” que, pode ser traduzido como “granulado óptico” (GOODMAN, 2007).

Figura 4.1: Configuração típica de um interferômetro com dupla iluminação.



Fonte: Próprio autor.

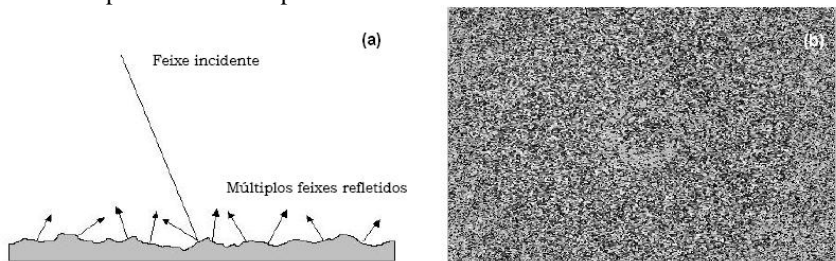
A configuração do interferômetro da mesma figura apresenta um padrão de franjas originário de deslocamentos na direção do vetor sensibilidade (vetor p). Na configuração com dupla iluminação o vetor sensibilidade é determinado pela diferença dos vetores unitários (s e t), que apontam para as direções de iluminação. Quando as direções de iluminação são simétricas em relação à normal da superfície, o vetor unitário p se situa no plano da superfície do objeto.

4.1.1 O speckle

Quando um feixe de laser incide sobre a superfície de um material, a rugosidade desta superfície faz com que a luz seja aleatoriamente refletida em várias direções (Figura 4.2-a). Estas ondas luminosas refletidas interferem e formam um padrão de pontos claros e

escuras denominados “*speckles*”. Esses pontos são distribuídos aleatoriamente e são resultados da interferência, ora construtiva, ora destrutiva, das diversas frentes de onda aleatórias (Figura 4.2-b).

Figura 4.2: (a) Luz incidindo em uma superfície rugosa, e (b) padrão de speckle observado por um sistema óptico.



Fonte: Peixoto Filho (2004, p.15,16).

No caso particular da dupla iluminação tudo se passa como se cada fonte de iluminação gerasse um padrão de *speckle* independente e o sistema óptico captasse a interferência entre eles. As ondas luminosas originada de cada padrão de *speckle* são temporalmente coerentes entre si com intensidades $I_A(x,y)$ e $I_B(x,y)$, fases $\theta_A(x,y)$ e $\theta_B(x,y)$. A interferência entre elas origina um novo padrão de *speckle* com intensidade resultante $I(x,y)$ e fase $\theta(x,y)$, podendo ser captada por um sensor CCD. A intensidade resultante é dada por (GAUSVIK, K. J. 1995):

$$I = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos \theta \quad (4.1)$$

onde:

I = Intensidade do padrão de *speckle* resultante no ponto (x,y) .

θ = Diferença de fase entre as ondas **A** e **B** no ponto (x,y) , ou seja:

$$\theta(x,y) = \theta_A(x,y) - \theta_B(x,y)$$

A intensidade luminosa captada por uma câmera CCD de 8 bits de resolução e monocromática é representada em tons de cinzas com escala entre 0 e 255. Quando θ for igual a um ângulo congruo 0° , tem-se uma interferência construtiva, e quando θ for igual a um ângulo congruo de 180° , tem-se uma interferência destrutiva (HARIHARAN, 2007).

Quando a superfície se deforma, ocorre uma mudança no ângulo de fase das frentes de onda que interferem e com isso há

mudanças nas intensidades luminosas dos *speckles*. Lembrando que a intensidade resultante da interferência só é estável quando as ondas luminosas que formam cada padrão de *speckle* é temporalmente coerente (HARIHARAN, 2007).

4.1.2 As franjas de interferência

A medição com holografia eletrônica freqüentemente é feita a partir da subtração dos padrões de *speckles* correspondentes a dois estados de deformação do material: o padrão de *speckle* do objeto no estado inicial de deformação e o padrão de *speckle* do objeto no estado final de deformação. Esta subtração causa o aparecimento de franjas interferométricas, expressando a região do material que sofreu um deslocamento na direção do vetor sensibilidade do interferômetro (vetor **p** na figura 4.1).

As franjas resultantes da deformação do objeto são obtidas continuamente através do valor absoluto da subtração das imagens que vão sendo adquiridas (I_d), à medida que o objeto se deforma, da imagem de referência (I_0). Esta diferença (I_f) é dada por (HARIHARAN, 2007):

$$I_f = (I_d - I_0)^2 = 16I_d I_0 \text{sen}^2 \left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \cdot \text{sen}^2 \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (4.2)$$

onde:

θ : Diferença de fase entre as ondas A e B no ponto (x,y), ou seja:

$$\Delta\theta(x,y) = \theta_A(x,y) - \theta_B(x,y)$$

$\Delta\theta$: É a variação de fase entre os estados do objeto deformado e em repouso. $\Delta\Phi_d = \theta_{Ad} - \theta_{Bd}$, $\Delta\Phi_0 = \theta_{A0} - \theta_{B0}$

$\left| \text{sen} \left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right|$: Representa o nível de ruído de fundo do padrão de interferência.

$\left| \text{sen} \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right) \right|$: Termo modulador que descreve as franjas de interferência.

4.1.3 Deslocamento de fase ou “Phase-shifting”

Na holografia eletrônica a técnica mais utilizada para determinar $\Delta\emptyset$, é através do deslocamento de fase de um dos feixes que interferem. Assim, o comprimento óptico de um dos feixes é variado de forma controlada. Isto é usualmente alcançado com um atuador *piezoelétrico* acoplado a um dos dois espelhos (**A** ou **B** da figura 4.1). Normalmente o atuador é calibrado em função do incremento (ou passo) de fase que produz.

A técnica de 4 passos é a mais usual para a determinação da fase e é dada por (ARKIN, 2007) :

$$\Delta\emptyset = \arctan \left[\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \right] \quad (4.3)$$

Onde: I_i é a intensidade registrada pelo pixel em cada passo i , e é calculado por (CREATH, 1993):

$$I_i(x, y) = U(x, y)[1 + C(x, y) \cos(\emptyset(x, y) + \alpha)] \quad (4.4)$$

No qual:

$U(x, y)$: Fator associado à intensidade media de cada pixel

$C(x, y)$: Fator relacionado ao contraste de cada pixel

$\emptyset(x, y)$: Ângulo de fase

α : Deslocamento angular de um dos feixes do laser em cada passo

Sendo que I_1 é a intensidade medida no primeiro passo de fase igual a 0° , I_2 é a intensidade medida no segundo passo de fase igual a 90° , I_3 é a intensidade medida no terceiro passo de fase igual a 180° , e I_4 é a intensidade medida do quarto passo de fase igual a 270° .

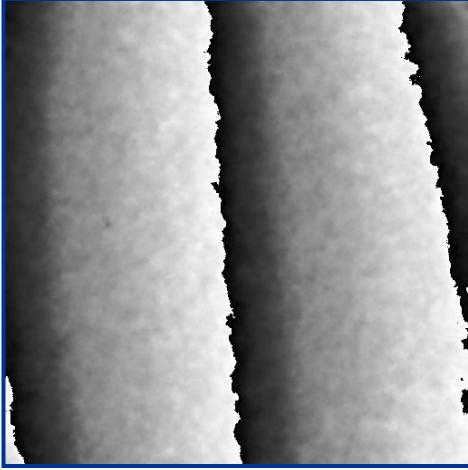
Alternativamente, a técnica dos cinco passos, proposta por Schwider-Hariharan (1987) adotada neste trabalho, pode ser usada para calcular a fase. Apresenta como vantagem ser menos sensível a erros na variação de fase de 90° do que o algoritmo de quatro passos. Neste método a determinação da fase e é dada por:

$$\Delta\emptyset_E = \arctan \left[\frac{2(I_2 - I_4) \sin \alpha}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (4.5)$$

O mapa da diferença de fases da superfície analisada permite que ela seja calculada dentro do intervalo de $-\pi$ a $+\pi$. A fase absoluta, ou contínua, é obtida pela integração dos valores fracionários da fase, onde múltiplos de 2π devem ser somados nos pontos de transição de $-\pi$ a $+\pi$. Esta operação é chamada de remoção do salto de fase ou *phase*

unwrapping. A figura 4.3 mostra um exemplo de mapa de fase absoluta após a subtração de duas imagens.

Figura 4.3: Exemplo de um mapa de fase absoluta gerado por ESPI.



Fonte: Albertazzi Jr. (2009).

4.1.4 Cálculo do deslocamento

O número de franjas gerado no mapa de fases depende, além do fenômeno físico estudado, do vetor sensibilidade. As componentes de deslocamentos são determinadas pela seguinte equação:

$$\vec{p} \cdot \vec{d} = \frac{\lambda(\Delta\phi_d - \Delta\phi_0)}{2\pi} \quad \text{ou} \quad \vec{p} \cdot \vec{d} = \lambda OF \quad (4.6)$$

Onde:

λ : comprimento de onda do laser [μm]

\vec{p} : vetor sensibilidade

\vec{d} : vetor deslocamento

$OF = \frac{\Delta\phi}{2\pi}$: ordem de franja, sendo que números inteiros correspondentes às franjas escuras no ponto (x,y).

4.2 PRINCÍPIOS DA INTERFEROMETRIA RADIAL

A holografia eletrônica com iluminação dupla possibilita obtenção de vetores de sensibilidade paralelos ou quase paralelos à superfície a ser medida. Mas como os deslocamentos ao redor de uma indentação ocorrem em duas direções, é necessária uma adequação neste tipo de configuração.

Albertazzi Jr. *et al.* (1995, 1996,1999), desenvolveram um interferômetro radial cuja principal característica é a medição de deslocamentos radiais em uma superfície. Este dispositivo foi aplicado inicialmente para a medição de tensões residuais pelo método do furo (ALBERTAZZI JR *et al.*, 1996) (BOETTGER, 1998) (BORGES, 2000) (RODACOSKI, 1997). Até então, o interferômetro radial era composto de dois espelhos cônicos para gerar iluminação dupla com sensibilidade radial em uma região circular.

Com a finalidade de inovar o interferômetro radial citado, Kapp (2010) apresentou uma forma alternativa de como o circuito óptico é gerado, empregando um elemento óptico difrativo em vez de elementos reflexivos e refrativos. O emprego deste tipo de elemento traz vantagens de desempenho, arranjo compacto, robustez e redução de custos.

A seção seguinte apresenta os princípios da tecnologia empregada no atual interferômetro radial.

4.2.1 Teoria da óptica difrativa

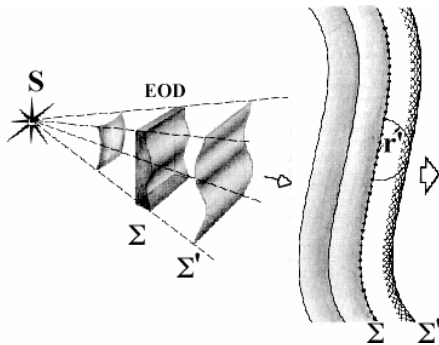
Na óptica física, além da reflexão e refração, existe ainda o fenômeno de difração, que também gera desvios da luz. “Normalmente é realizado pelas denominadas redes de difração, que são constituídas por tramas de linhas finas afastadas de uma quantidade da ordem de até poucos comprimentos de onda da luz incidente. Os desvios provocados pela difração são seriados em ordens positivas e negativas, pares e ímpares.

A óptica difrativa é uma nova tecnologia que elimina quase todas as etapas dos métodos tradicionais (abrasão e polimento) para a fabricação de elementos ópticos. Por atuarem segundo os princípios da difração, estes elementos ópticos são denominados Elementos Ópticos Difrativos (EOD).

Elementos ópticos difrativos são estruturas que difratam a luz, gerando uma distribuição de luz desejada. Segundo o princípio de

Huygens-Fresnel (GOODMAN, 1988) (HECHT, 1984), representado na Figura 4.4, quando um elemento óptico difrativo é iluminado por uma frente de onda. Cada ponto da nova frente de onda Σ que emerge da superfície do elemento age como uma fonte de luz pontual, gerando ondas esféricas de raio \mathbf{r}' . A interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica gera uma nova frente de onda Σ' (GONÇALVES, 2007).

Figura 4.4: Princípio de Huygens-Fresnel, onde cada ponto de uma frente de onda incidente age como uma nova fonte de onda esférica, cuja interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica por sua vez nos dá uma nova frente de onda.

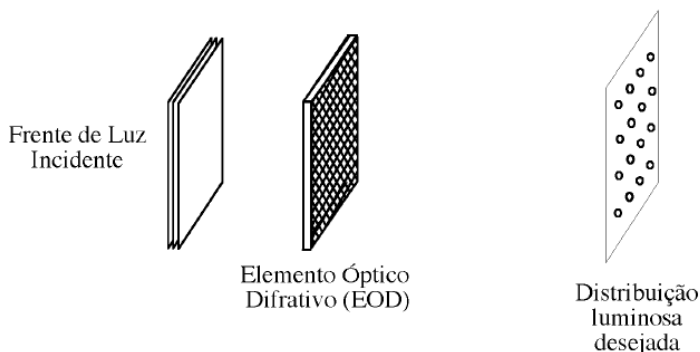


Fonte: Gonçalves (2007, p. 5).

Hologramas gerados por computador, redes de difração e microlentes de Fresnel são alguns exemplos de EODs que podem ser obtidos por intermédio de relevos gravados na superfície de um material transparente ou reflexivo, ou por padrões gravados em filmes fotográficos. Estes relevos ou padrões impõem uma modulação espacial na fase da luz incidente que, após sofrer o efeito da difração, resulta em uma distribuição luminosa desejada em algum plano próximo do elemento difrativo, como é ilustrado na figura [4.5]. Geralmente, por ser necessário apenas introduzir um pequeno atraso na fase ou o bloqueio em cada ponto da frente de onda incidente, os EODs podem ser mais finos e leves que os elementos ópticos convencionais

(refrativos) (GONÇALVES, 2007 apud VELDKAMP; MCHUGH, 1992, p. 5).

Figura 4.5: Obtenção de uma distribuição de luz desejada utilizando-se um elemento óptico difrativo para a modulação de uma frente de luz incidente.



Fonte: Gonçalves (2007, p. 6).

Os EODs são projetados com base em suas propriedades superficiais de difração, geralmente sendo micro-estruturada com detalhes geométricos próximos ao comprimento de onda da luz. Como geralmente é utilizada a teoria escalar da difração para o cálculo destes elementos, as dimensões das micro-estruturas abordadas são maiores que dez vezes o comprimento de onda da luz incidente. Várias distribuições ópticas podem ser “gravadas” em um EOD modificando-se a geometria das microestruturas, que podem ser fabricadas utilizando as técnicas inicialmente desenvolvidas para a fabricação de circuitos integrados eletrônicos como as litografias óptica e por feixe de elétrons, a corrosão por plasma, a deposição de filmes finos e a corrosão úmida. Estas técnicas podem imprimir diretamente na superfície as mais diversas configurações geométricas, em escalas extremamente pequenas. Podem-se produzir dispositivos de alta qualidade em série, com propriedades ópticas complexas (GONÇALVES, 2007).

A geometria dos EODs é obtida por cálculo numérico, considerando a difração da luz, as características ópticas do material

utilizado (óxido de silício, nitreto de silício, DLC, etc.) e das micro-estruturas a serem projetadas (GONÇALVES, 2007).

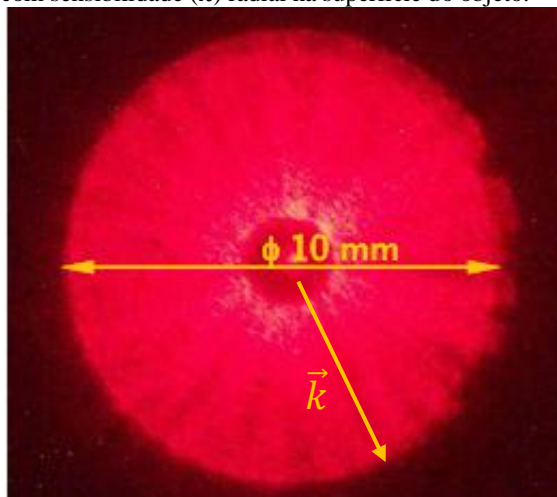
Através de cálculos matemáticos, é possível dimensionar elementos para exercer uma grande variedade de funções ópticas. É possível inclusive selecionar quais ordens de difração serão reforçadas ou canceladas. Assim, os elementos ópticos difrativos [...] são uma opção muito versátil para a engenharia óptica, sendo competitivo com as outras técnicas (reflexão e refração) conforme a aplicação ou preenchendo lacunas deixadas por estas. (KAPP, 2010, p. 25).

4.3 A ROSETA ÓPTICA DIFRATIVA

O principal requisito do interferômetro radial plano é a obtenção de iluminação cônica, com sobreposição concêntrica, a fim de se ter holografia eletrônica com dupla iluminação, resultando em sensibilidade radial e no plano. A partir de um fecho colimado este tipo especial de iluminação pode ser obtido por reflexão, através de espelho cônico, ou pela difração, através de um DOE (*Diffractive Optical Element*) especial.

Um interferômetro de holografia eletrônica com dupla iluminação com sensibilidade radial no plano, que tem a iluminação cônica gerada através de um elemento óptico difrativo, foi uma inovação proposta por Kapp (2010), e é o sistema de medição utilizado neste trabalho para quantificar o campo de deslocamentos ao redor de uma indentação. A figura 4.6 mostra uma imagem típica da área iluminada de medição gerada neste sistema de medição:

Figura 4.6: Área de iluminação típica gerada pelo sistema óptico de medição com sensibilidade (\vec{k}) radial na superfície do objeto.



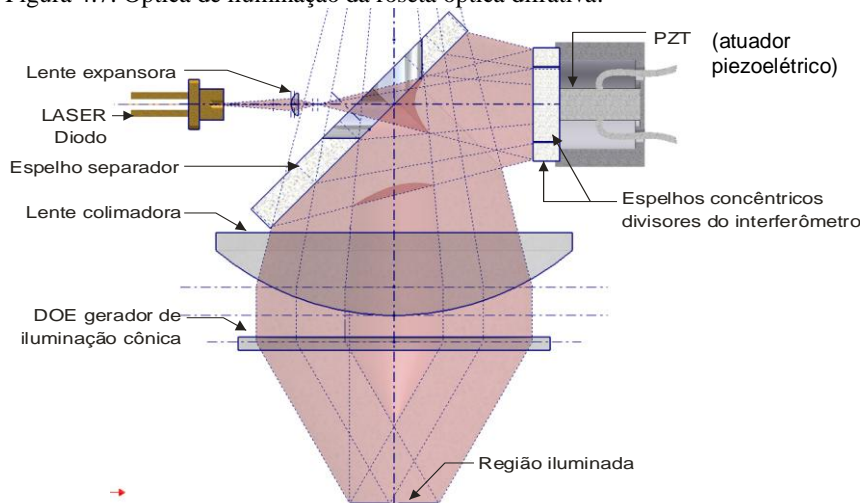
Fonte: Suterio (2005, p. 142).

4.3.1 Óptica de iluminação

É a parte do sistema responsável pela iluminação da região de medição do interferômetro radial plano.

Conforme mostrado na figura 4.7, o fecho cônico oriundo do laser é divergido pela lente expansora, passa pelo furo oblíquo do espelho separador, em direção aos espelhos geradores de deslocamento de fase (concêntricos). Deste retorna no sentido oposto, de maneira concêntrica, e incide na superfície do espelho separador com diâmetro maior que o furo oblíquo. O espelho desvia o fecho agora em direção a uma lente colimadora e, em seguida, ao DOE gerador de iluminação cônica e este emite um fecho cônico em direção à região de medição na peça.

Figura 4.7: Óptica de iluminação da roseta óptica difrativa.

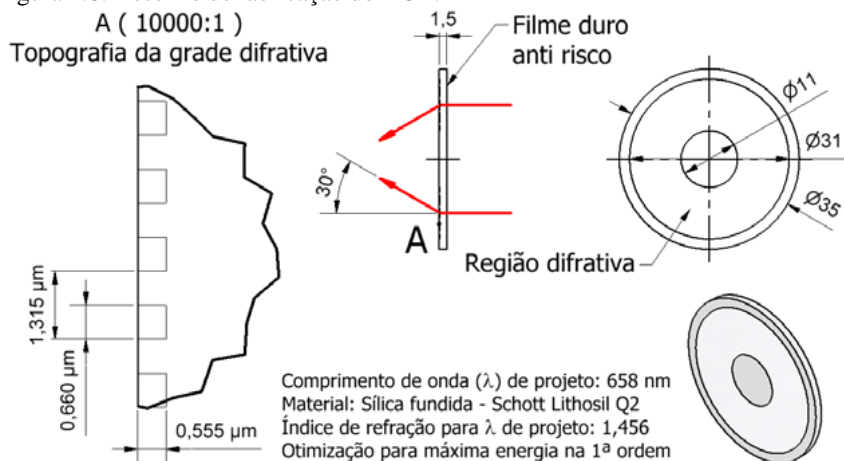


Fonte: Kapp (2010, p. 46).

4.3.2 DOE gerador de iluminação cônica

A figura 4.8 mostra o desenho de fabricação do DOE dimensionado por Kapp (2010), que no primeiro desenvolvimento teve como especificações importantes o passo da grade para gerar 30° de deflexão com o laser de 658 nm de comprimento de onda, e a profundidade da grade dimensionada para minimizar as ordens pares, principalmente a zero e maximizar as ordens ± 1 . Apenas a ordem $+1$ é aproveitada para o interferômetro, mas a ordem -1 não atrapalha porque é dirigida para fora do campo de medição.

Figura 4.8: Desenho de fabricação do DOE.



Fonte: Kapp (2010, p. 84).

Para detalhes mais específicos do sistema óptico de iluminação e de observação da DOE é indicada a leitura de Kapp (2010).

CAPÍTULO 5

5 O SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição de tensões residuais por holografia eletrônica utilizado neste trabalho engloba:

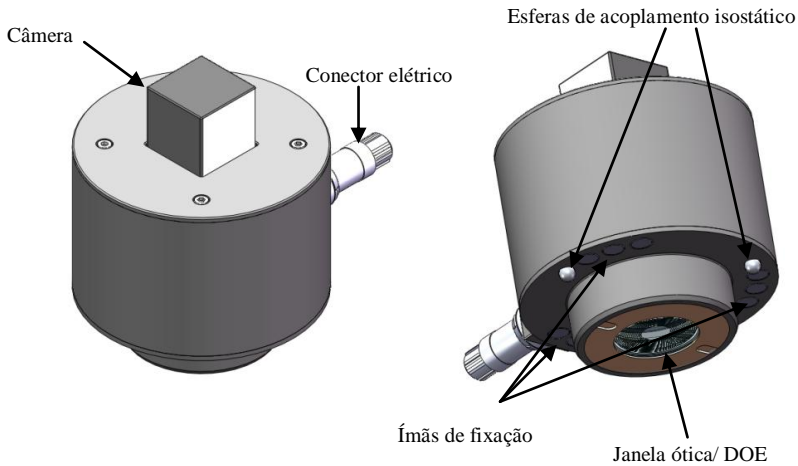
- cabeçote de medição;
- indentador instrumentado;
- base de fixação;
- eletrônica de medição e controle;
- simuladores de tensão;
- corpos de prova;

O presente capítulo apresenta, separadamente, cada um destes componentes e suas características.

5.1 CABEÇOTE DE MEDIÇÃO

É o subconjunto que encapsula a roseta óptica difrativa. Foi projetado e desenvolvido por Kapp (2010) no LabMetro, seguindo a linha de pesquisa deste laboratório na área de medição de tensões residuais por holografia eletrônica. As figuras 5.1 e 5.2 ilustram este módulo:

Figura 5.1: Modelo 3D de projeto do cabeçote de medição.



Fonte: Próprio autor.

O cabeçote de medição integra (KAPP, 2010):

- **Eletrônica de ativação do laser:** o laser diodo é um componente que necessita de um controle peculiar da corrente para que este tenha uma vida adequada, estabilidade de potência e de comprimento de onda.
- **Eletrônica de acionamento do PZT para deslocamento de fase:** o cristal piezelétrico empregado é muito simples, não tendo realimentação para controle de posição e histerese.
- **Eletrônica de controle e interface da câmera:** a câmera é padrão IEEE1394, compatível com o padrão de DCAM, que permite seu controle total remotamente.
- **Estrutura mecânica:** concebida para dar estabilidade ao conjunto, pois para que o sistema resista a vibrações, os componentes internos do circuito óptico devem estar rigidamente fixos entre si. Para tal Kapp (2010) criou um arranjo compacto, com pequenas distâncias entre componentes, obtendo baixa massa, elevada rigidez, gerando elevada frequência natural. Nas frequências elevadas os deslocamentos são menores e o efeito de filtro “passa-baixa” do sistema de aquisição, tornam estas frequências inócuas.

A tabela 5.1 apresenta algumas características metroológicas do cabeçote de medição:

Tabela 5.1: Aspectos metroológicos do módulo de medição.

Faixa de medição:	até 4000 $\mu\text{m/m}$
Temperatura de operação:	0-40 [°C]
Diâmetro da região de medição:	7 mm

FONTE: Próprio autor.

5.1. INDENTADOR INSTRUMENTADO

O módulo de indentação realiza indentações de forma automatizada e instrumentada, ou seja, aciona e monitora o deslocamento e a penetração da ponta indentadora, bem como a força que está sendo aplicada. Com esta característica, é possível também realizar o levantamento da curva carga-profundidade de penetração, característica fundamental para a determinação das propriedades mecânicas (elastoplásticas) do material.

Baseando na experiência sobre indentação de trabalhos anteriores, obtidos por equipes de pesquisa da Universidade Federal de Uberlândia (RAMOS NETO et al., 2003) (CALEGARI et al., 2005) foi projetado e construído por pesquisadores do LabMetro-UFSC (período de 2009-2010) um sistema de indentação instrumentada. Este módulo é utilizado neste trabalho e possui as seguintes características:

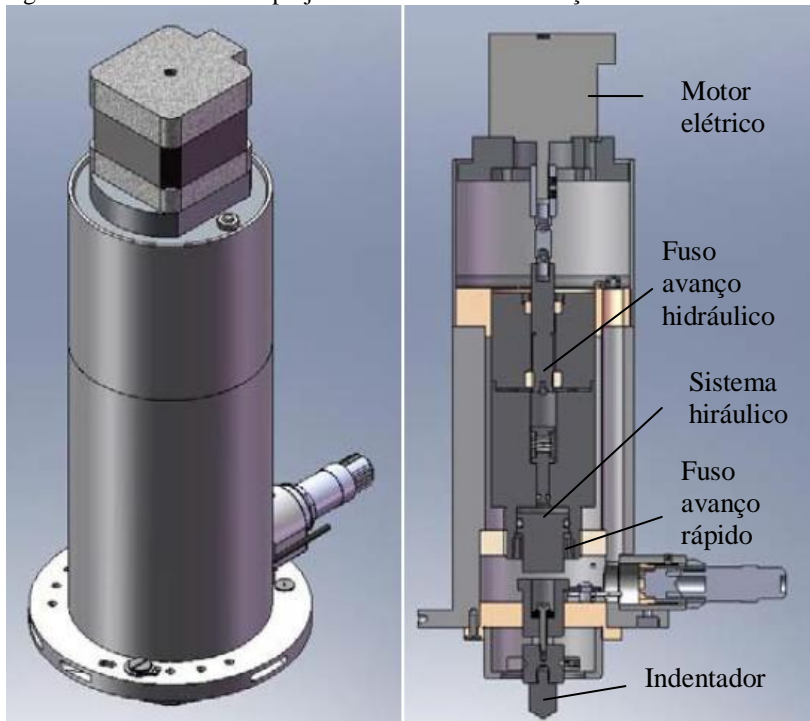
- Fixação de forma rígida e com boa repetitividade de posicionamento em relação à base de medição;
- Fácil instalação/remoção da base;
- Aplicação e medição de forças de indentação controláveis de 50 N até 2000 N;
- Efetua penetrações de 0,1 mm até 0,3 mm;
- Utiliza uma ponta indentadora intercambiável/substituível;

A fonte de aplicação de força do indentador é um motor elétrico de passo modelo SM1.8-A1740IT-SE da Action Motors (tipo imã permanente, passo de 7,5°, torque de 2,7 N.m (28 kgf.cm).

O princípio de multiplicação de força deste sistema (figura 5.2) é hidráulico, baseado no uso de dois cilindros de diferentes tamanhos. O sistema conta também com dois fusos. Um deles desloca todo o

conjunto e serve como um avanço rápido para aproximar a ponta indentadora da superfície que deve ser indentada. Uma vez que a ponta indentadora entra em contato com a superfície, o atrito faz aumentar o torque requerido ao motor. Desta forma, a mola da embreagem é acionada e começa a ser deslocado o fuso menor que ativa o cilindro menor.

Figura 5.2: Modelo 3D de projeto do módulo de indentação instrumentado.



Fonte: Próprio autor.

A figura 5.3 mostra uma foto do módulo de indentação instrumentado:

Figura 5.3 Foto do módulo de indentação instrumentado.



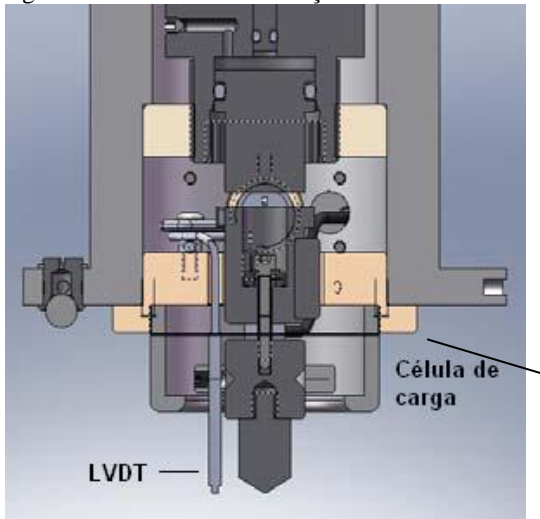
Fonte: Próprio autor.

5.1.1 Transdutores do módulo de indentação

Na Figura 5.4 é mostrado um detalhe ampliado da ponta do indentador. Nesta, existe um transdutor de força *piezoelétrico* (célula de carga) que, quando deformado, gera uma carga elétrica proporcional, que depois de transformada em tensão elétrica por um amplificador de carga, é convertido em um valor de força. O monitoramento de profundidade de indentação é realizado por um transdutor de deslocamento indutivo (*linear variable differential transformer* - LVDT) solidário à ponta indentador. O funcionamento deste transdutor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. É gerado um sinal de tensão linear de saída, proporcional ao deslocamento do núcleo, que

está fixado ou em contato com o que se deseja medir. Desta forma é possível medir somente quanto do indentador entrou no material, sem medir pequenos deslocamentos que possam acontecer no sistema de fixação do indentador.

Figura 5.4: Corte com a indicação dos transdutores do módulo de indentação.



Fonte: Próprio autor.

A tabela 5.2 apresenta as características metrológicas para os dois transdutores presentes no indentador instrumentado:

Tabela 5.2: Especificações metrológicas para os transdutores do módulo de indentação.

Transdutor	Força	Deslocamento
Marca/modelo	Kistler/ 9131B	Singer/GHSM–2.5B
Faixa de medição	0 N a 2,5 kN	±2.5 mm
Faixa de temperatura de operação	-20°C to +120 °C	-20°C to +70 °C
Erro de linearidade	≤±1,0% FE	2.0% FE

FONTE: Próprio autor.

Os princípios de funcionamento e as características destes tipos de transdutores podem ser encontrados na bibliografia especializada (FRADEN, 2003) (GAUTSCHI, 2012) (REGHU; VETELINO, 2003) (SOLOMAN, 1998).

5.2 BASE DE FIXAÇÃO

Decorrente de projetos anteriores, o cabeçote de medição disponível no laboratório já possuía uma base universal para fixá-lo sobre a peça a ser medida (SUTERIO, 2005). Mas devido à magnitude mais elevada das forças envolvidas no processo de indentação, foi decidido realizar o projeto de uma nova base a qual pudesse suportar esta carga e apresentasse também um sistema de posicionamento isostático.

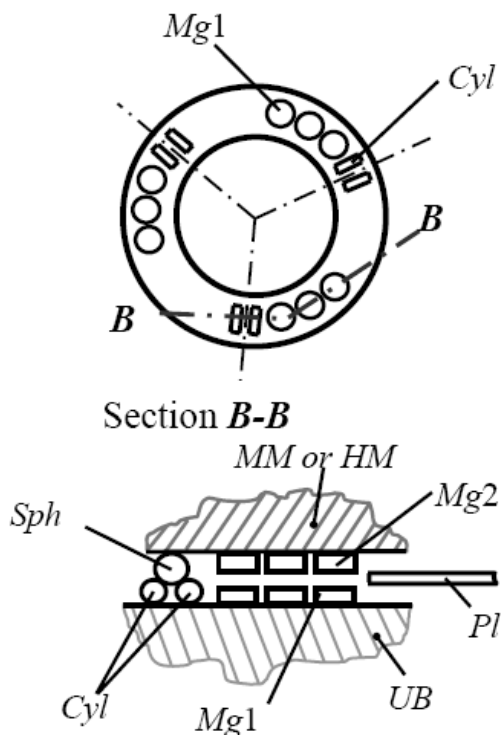
Na concepção desta nova base, algumas mudanças foram consideradas. Destacam-se:

1. Mudança de material para aumentar a resistência mecânica da mesma;
2. Alteração na forma do acionamento isostático para incrementar a força dos ímãs e diminuir o atrito;
3. Três blocagens, com aperto manual, foram introduzidas para complementar a força dos ímãs do sistema isostático, evitando que o módulo indentador se solte durante a realização da indentação.

Como são utilizados alternadamente dos módulos de indentação e de medição em cada ensaio, foi projetado e construído um sistema de apoio isostático compatível também com o cabeçote de medição.

A interface está desenhada de forma simplificada na figura 5.5. Tanto o módulo de indentação como o de medição têm três esferas (**Sph**) posicionadas a 120° e um conjunto de nove ímãs de terras raras (**Mg2**) fixados rigidamente neles. A interface (na base universal) possui três pares de suportes cilíndricos (**Cyl**) posicionados a 120°, outro conjunto similar de nove ímãs (**Mg1**) e uma placa móvel (**PI**) de material ferro-magnético. Quando os módulos de medição ou de indentação são posicionados sobre a base universal, as três esferas são posicionadas sobre cada par de suportes cilíndricos. Ambos os módulos de medição e indentação podem ser fixados rigidamente (de forma alternada) interpondo-se a placa (**PI**) entre os dois conjuntos de ímãs.

Figura 5.5: Esquema do sistema isostático de reposicionamento dos módulos de medição e de indentação.

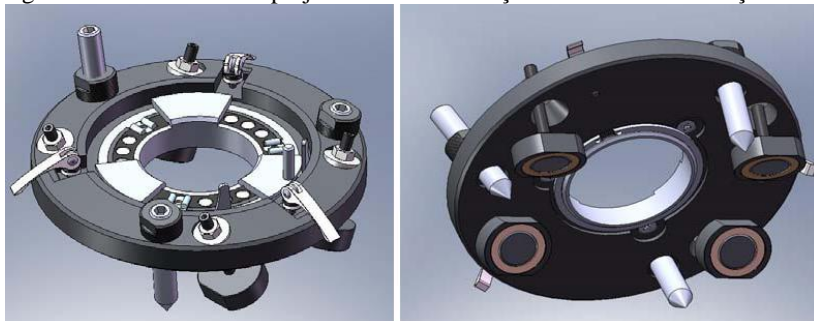


Fonte: Kaufmann (2011, p. 30).

Testes anteriores a este trabalho, realizados em um corpo de prova descarregado, permitem verificar que os módulos de medição e de indentação podem ser reposicionados com um erro menor do que um quarto do comprimento de onda do laser usado como fonte de luz (aproximadamente $0,150\ \mu\text{m}$).

As figuras 5.6 e 5.7 mostram a base universal projetada para o sistema de medição:

Figura 5.6: Modelo 3D de projeto da base de fixação do sistema de medição.



Fonte: Próprio autor.

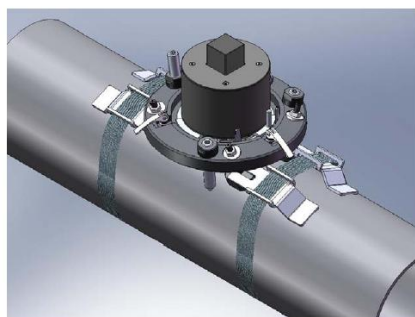
Figura 5.7: Foto da base de fixação em conjunto com o cabeçote de medição.



Fonte: Próprio autor.

Finalmente, um conjunto de cintas com pés elásticos foi projetado, anteriormente a este trabalho, para complementar a força aplicada pelos pés magnéticos que fixam a base à superfície do material a ser medido. Os quatro pés com os ímãs apresentam uma força de 220 N cada um, resultando em uma força magnética total de 880 N. As fitas complementarão a carga de fixação dos mesmos aplicando forças da ordem de 1200 N. A figura 5.8 mostra as montagens da base fixação com o cabeçote de medição e com o indetador:

Figura 5.8: Modelo 3D da montagem usando a base de fixação: (a) com o cabeçote de medição e (b) em conjunto com o módulo de indentação instrumentada.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

5.2.1 Simulador de tensão

Os sistemas simuladores de tensão são dispositivos onde corpos de prova sem tensões residuais e instrumentados são carregados externamente, gerando campos de tensões mecânicas que servem como referência para a calibração do sistema de medição de tensões residuais.

Como disposto anteriormente, a proposta deste trabalho é a medição de tensões residuais uniaxiais. Logo, é usado um dispositivo para simulação de tensões residuais em uma direção, descrito na subseção a seguir.

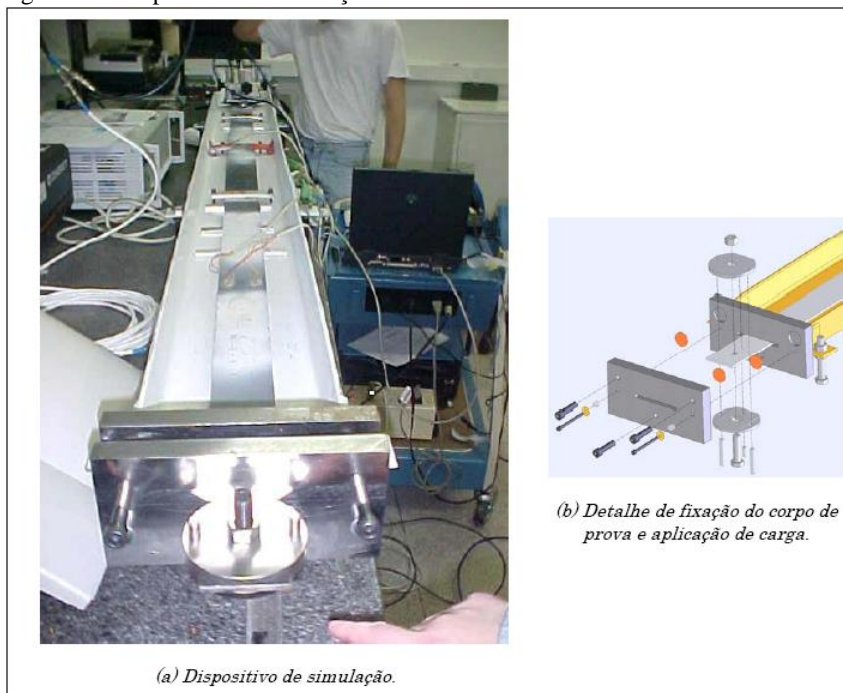
5.2.1.1 Simulador uniaxial por tração pura

O simulador utilizado neste trabalho é o mesmo usado por Suterio (2005) e o corpo de prova empregado também possui a mesma configuração do testado por este autor.

Basicamente este dispositivo é composto por um perfil “U” em aço e um sistema de parafusos para aplicação de carregamento nas extremidades de corpos de prova, de barra chata de 3 m de comprimento - figura 5.9 (b); larguras e espessuras máximas de 70 x 5 mm

respectivamente. A aplicação de carga é realizada através do aperto de três parafusos em cada extremidade como forma de possibilitar a aplicação de deformações uniformes à tração no sentido longitudinal do corpo de prova (carregamento uniaxial) sem a presença de momentos fletores.

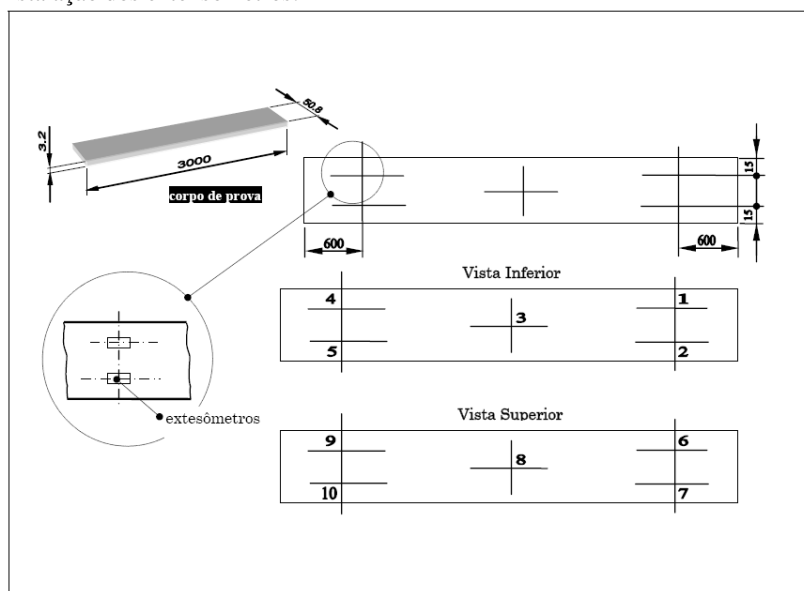
Figura 5.9: Dispositivo de simulação de tensões residuais uniaxiais.



Fonte: Suterio (2005, p. 46).

Nos corpos de provas ensaiados, dez extensômetros de resistência são instalados em suas superfícies, cinco na inferior e cinco na superior, com o objetivo de monitorarem a distribuição de deformações elásticas à qual a barra é submetida. Os extensômetros são numerados de 1 a 10, conforme apresentado na figura 5.10.

Figura 5.10 Esquema do corpo de prova com configuração e identificação de instalação dos extensômetros.



Fonte: Suterio (2005, p. 43).

Para a monitoração dos extensômetros, utilizou-se uma ponte amplificadora de dezesseis canais, modelo AB22A, HBM – apresentada na figura 5.11:

Figura 5.11 Ponte amplificadora para medição de deformação dos extensômetros instalados nos corpos de prova.



Fonte: Suterio (2005, p. 44).

As características metrológicas do dispositivo de simulação de tensões residuais foram obtidas por Suterio *et al.* (2003a, 2003b), que propôs um procedimento para obtenção de tensão uniforme e as incertezas envolvidas nas simulações de tensões mecânicas. O procedimento proposto basicamente pode ser resumido no nivelamento do corpo de prova descarregado em relação ao dispositivo, zeragem dos extensômetros e aplicação de carga no corpo de prova. Segundo Suterio (2005) com o procedimento proposto, na faixa de 100 $\mu\text{m/m}$ a 1000 $\mu\text{m/m}$, é possível obter incertezas da ordem de 3% a 8 % nas medidas de deformações simuladas.

5.2.2 Material Ensaiado

Um tipo de material, apenas, foi utilizado nos ensaios de indentação do corpo de prova: o aço. Para minimizar as tensões residuais macroscópicas, o corpo de prova de aço, especificado como SAE 1020, foi tratado termicamente, tendo sofrido um recozimento pleno a 870°C por três horas, resfriamento até 700°C a uma taxa de 17°C

por hora, seguido de resfriamento ao ar livre, até a temperatura ambiente.

Resumidamente, as propriedades utilizadas do material, alguns níveis de carregamento nominal, e relativos à tensão de escoamento do material, estão apresentados na tabela 5.2:

Tabela 5.2: Propriedades mecânicas e níveis de carregamento do corpo de prova ensaiado.

Deformação ($\mu\text{m/m}$)	Material	Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão (MPa)	% do limite de escoamento do material
0	Aço SAE 1020	295 ± 30	200 ± 6	$0,29 \pm 0,02$	0	0
295					59	20
590					118	40
885					177	60
1180					236	80

FONTE: Peixoto Filho (2004) e Suterio (2005).

CAPÍTULO 6

Este capítulo descreve a formulação do modelo matemático usado para quantificar as tensões residuais.

6 O MODELO MATEMÁTICO

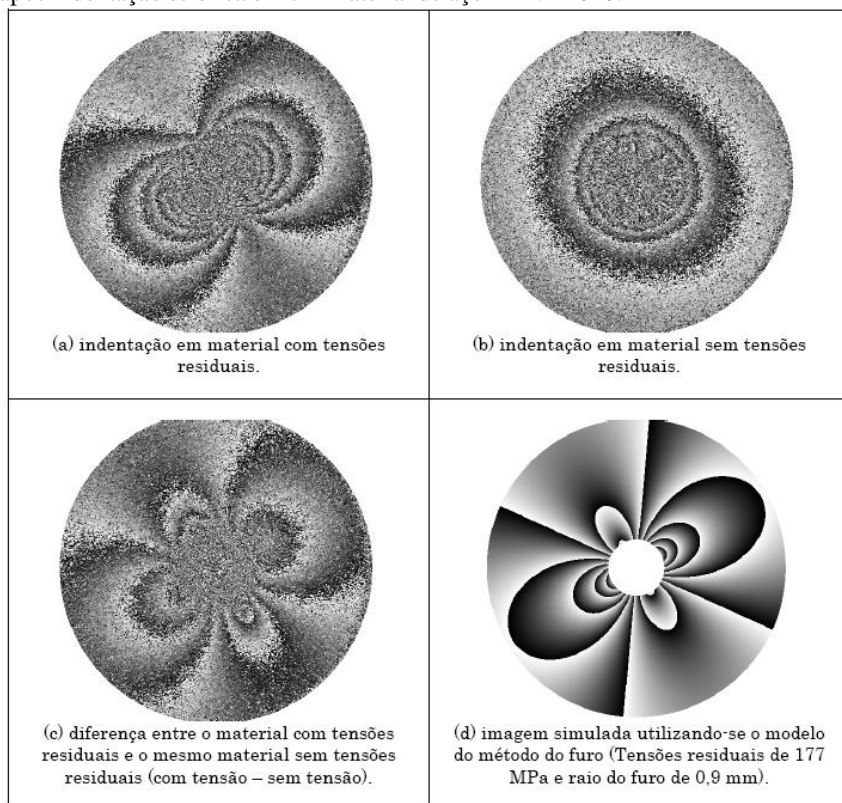
Suterio (2005) descreveu resumidamente a mecânica do processo físico da indentação em um material com tensões residuais e também como isolar seus efeitos:

- 1) o material apresenta um estado de tensões residuais inicial antes da indentação;
- 2) a indentação provoca uma tensão compressiva intensa na região indentada e nas suas vizinhanças;
- 3) as tensões induzidas pela indentação se combinam com as tensões residuais preexistentes levando o material ao escoamento de forma diversa em distintas regiões. As tensões residuais preexistentes influenciam as regiões que escoam, e sofrem modificações tanto em direção quanto em intensidade;
- 4) após a remoção da ferramenta de indentação, uma deformação plástica residual permanece na superfície indentada, contendo duas componentes: (a) uma decorrente da indentação apenas e (b) outra decorrente da interação dos efeitos das tensões residuais combinadas com a indentação;
- 5) o efeito das tensões residuais pré-existentes pode ser isolado subtraindo o campo de deslocamentos radiais total da superfície indentada pelo campo de deslocamentos radiais resultante de uma indentação que o mesmo material apresentaria se não tivesse tensões residuais iniciais. Esta operação elimina o efeito da tensão induzida pelo indentador (SUTERIO, 2005, p. 51).

O mesmo autor, através de simulações e dados experimentais, demonstrou a semelhança de imagens de fase de materiais furados e de peças indentadas:

Observa-se o padrão da diferenças de fase que correspondem aos campos de deslocamentos radiais medidos com o interferômetro radial por holografia eletrônica e o método da indentação em um corpo de prova de aço ABNT 1020. A figura [6.1(a)] corresponde à indentação do corpo de prova com tensões residuais mecanicamente simuladas em torno de 177 MPa (correspondente à deformações de 886 $\mu\text{m/m}$), com direção principal em torno 30° em relação ao eixo horizontal das imagens. A figura [6.1(b)] corresponde à indentação ao corpo de prova livre de tensões residuais iniciais. [...] Ao subtrair os campos de deslocamentos das figuras [6.1(a) e 6.1(b)] a figura resultante, [6.1(c)], é muito semelhante à que seria obtida se o método do furo fosse aplicado para este mesmo carregamento, figura [6.1(d)] (SUTERIO, 2005, p. 52).

Figura 6.1: Campo de deslocamentos radiais medido por holografia eletrônica após indentação esférica em um material de aço ABNT 1020.



Fonte: Suterio (2005, p. 53).

Após comprovada esta semelhança de fenômenos, Suterio (2005) desenvolveu modelos semi-empíricos baseados no método do furo com algumas considerações e fatores de correção.

No atual momento ainda não foi identificado na literatura um modelo analítico capaz de representar de forma completa o fenômeno de superposição da carga induzida pela indentação com as tensões residuais pré-existent na superfície do material. Assim, para correlacionar o campo de deslocamentos radiais medidos com as tensões principais, é utilizado neste trabalho o modelo semi-empírico proposto e avaliado por Suterio (2005), apresentado a partir da próxima seção.

6.1 MODELAMENTO DO MÉTODO DO FURO

O Método do Furo para medição de tensões residuais é apresentado na seção 2.3. Basicamente este consiste na execução de um furo na superfície de um material com tensões residuais, o que causa um alívio de tensões localizado. O reequilíbrio destas tensões nas imediações da região furada causa alterações do campo de deformações na superfície do material, que são medidas e correlacionadas com o estado de tensões iniciais.

Para a maioria das aplicações que utilizam o Método do Furo, a usinagem resulta em furo não passante (furo cego), sendo realizado com profundidade aproximadamente igual ao diâmetro da broca, geralmente pequena quando comparada com a espessura da peça a ser avaliada.

6.1.1 Furo passante

Os deslocamentos u e v em coordenadas polares nas direções radial e tangencial respectivamente, estão relacionados com as deformações e tensões elásticas no estado plano de tensão pela lei de Hooke por (DALLY; RILEY, 1991) (LOVE, 1927) (MALVERN, 1969):

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) \qquad \varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \qquad (a)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r) \qquad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \qquad (b) \quad (6.1)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{G} \tau_{r\theta} = \frac{2(1-\nu)}{E} \tau_{r\theta} \qquad \gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \qquad (c)$$

onde:

ε_r = deformação radial;

ε_θ = deformação tangencial;

$\gamma_{r\theta}$ = deformação angular;

σ_r = tensão radial;

σ_θ = tensão tangencial;

$\tau_{r\theta}$ = tensão cisalhante;

E = módulo de elasticidade;
 G = módulo de torção;
 ν = coeficiente de Poisson;
 r = raio;
 θ = ângulo (coordenada polar).

Devido à sensibilidade do sistema de medição utilizado neste trabalho (interferômetro radial), só são medidas as componentes radiais de deformação e deslocamento. A solução elástica para o método do furo passante, a deformação radial em termos de tensões principais é dada da seguinte forma (DALLY; RILEY, 1991):

$$\varepsilon_r(r, \theta) = A(r)(\sigma_1 + \sigma_2) + B(r)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.2)$$

onde:

$$A(r) = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2; \quad B(r) = -\frac{1}{2E} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \left[-3(1+\nu) \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 + 4 \right]$$

r_0 = raio do furo;

β = direção das tensões principais;

(r, θ) = coordenadas polares.

$A(r)$ e $B(r)$ são funções dependentes do raio, das propriedades do material e da forma geométrica do furo.

A componente de deslocamento radial pode ser obtida, substituindo $\mathbf{A(r)}$ e $\mathbf{B(r)}$ na equação 6.2 e integrando a deformação radial da equação 6.1(a), em relação ao raio, ou seja:

$$u_r(r, \theta) = \int_{r=r_0}^{r=\infty} \varepsilon_r(r, \theta) dr \quad (6.3)$$

Obtendo-se assim a seguinte expressão:

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{1}{r} r_0^2 (\sigma_1 + \sigma_2) + \left(\frac{1}{2E}\right) \frac{1}{r} r_0^2 \left[4 - \frac{(1+\nu)}{r^2} r_0^2 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) + T(\theta) \quad (6.4)$$

onde:

$T(\theta)$ = função de θ que representa os deslocamentos de corpo rígido dos pontos medidos, relativos à peça e/ou ao interferômetro, onde (SUTERIO, 2005):

$$T(\theta) = T_x \cdot \cos(\theta) + T_y \cdot \sin(\theta)$$

As componentes de deslocamentos de corpo rígidos podem ser facilmente eliminadas através de processamento de imagens. Assim a equação 6.4 pode ser reescrita da seguinte forma (SUTERIO, 2005):

$$u_r(r, \theta) = \bar{A}(r)(\sigma_1 + \sigma_2) + \bar{B}(r)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.5)$$

onde:

$$\bar{A}(r) = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r}\right) r_0^2; \quad \bar{B}(r) = \frac{1}{2E} \left(\frac{1}{r}\right) r_0^2 \left[4 - \frac{(1+\nu)}{r^2} r_0^2 \right]$$

Nota-se que **A(r)** e **B(r)** também são funções dependentes do raio, das propriedades do material e da geometria do furo.

6.1.2 Furo Cego

Similarmente, para o método do furo cego na medição de tensões residuais, fatores de correção experimental, ou calculados por elementos finitos, são acrescentados ao modelo analítico do furo passante. O método do furo cego apresenta certa complexidade, sendo que nenhuma forma fechada de solução analítica foi encontrada na literatura para o cálculo direto das tensões residuais para medição de deformações.

Freqüentemente são introduzidos coeficientes de correção empíricos (SUTERIO, 2005). Estes coeficientes empíricos foram propostos por Schajer (1988a, 1988b), sendo aceitos e adotados pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) por apresentarem excelente concordância com resultados experimentais (ASTM, 2008).

Para medidas de deslocamentos, Makino e Nelson (1994), também verificaram a necessidade de levar em conta os limites de profundidade do furo cego, calculando coeficientes de correção por elementos finitos e apresentando uma alteração da equação 6.5, reescrita da seguinte forma (SUTERIO, 2005):

$$u_r(r, \theta) = A r_0 \bar{a} \left(\frac{r_0}{r}\right) (\sigma_1 + \sigma_2) + B r_0 \bar{b} \left(\frac{r_0}{r}\right) (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.6)$$

onde **A** e **B** são constantes dadas por:

$$A = \frac{1 + \vartheta}{2E} \qquad B = \frac{1}{2E}$$

$\bar{a}\left(\frac{r_0}{r}\right)$ e $\left(\frac{r_0}{r}\right)$, são funções retiradas do trabalho de Makino e Nelson (1994).

6.2 MODELO ANALÍTICO APROXIMADO PARA A INDENTAÇÃO

Dois modelos analíticos aproximados, derivados do método do furo, foram propostos por Suterio (2005), onde coeficientes e fatores de correção são empiricamente determinados através de conjuntos de experimentos controlados. O primeiro modelo proposto é inspirado na formulação do furo passante, e o segundo, na formulação do furo cego.

Como consequência da adição de tensão, um campo de deslocamentos permanente é produzido ao redor de uma indentação. Em um material livre de tensões residuais, este campo de deslocamentos permanente é axisimétrico e repetitivo, caso, a geometria da ponteira, o carregamento de indentação e as propriedades do material, se mantenham constantes. Se uma tensão mecânica ou tensões residuais estiverem presentes no material antes da indentação, o campo de deslocamento permanente é afetado de modo a depender dos níveis de tensões residuais preexistentes (SUTERIO, 2005, p. 58).

Partindo-se do princípio que o campo de deslocamentos resultante da subtração entre a indentação de um material com tensões residuais pré-existentis menos a de um material sem tensões residuais iniciais tem comportamento que guarda certa semelhança com o da equação 6.5, novas funções $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ e $\mathbf{B}(\mathbf{r})$, podem ser determinadas. Estas dependem das propriedades do material, da forma geométrica da ferramenta de indentação (esférica ou cônica), da carga, da profundidade (elástica e plástica) e do diâmetro da marca da indentação (SUTERIO, 2005).

6.2.1 Modelos derivados do método do furo passante

De modo a encontrar um modelo para medir as tensões residuais presentes no material, tal similaridade é empregada. Assim, um modelo derivado é apresentado partindo-se da equação 6.5, onde observa-se que o termo que depende de $\cos(2\theta)$ está correlacionado à diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) e o termo independente de θ está correlacionado à soma das tensões principais ($\sigma_1 + \sigma_2$). Assim, a componente radial do campo de deslocamento (u_r), em termos de coordenadas polares, é aqui modelada pela seguinte equação (SUTERIO, 2005):

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left[\left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} - \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_3}{r^3}\right] \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.7)$$

onde K_1 , K_2 e K_3 são funções desconhecidas, dadas por:

$$\begin{aligned} (\sigma_1 + \sigma_2) &= K_1(\psi_1) \\ (\sigma_1 - \sigma_2) &= K_2(\psi_2) \\ (\sigma_1 - \sigma_2) &= K_3(\psi_3) \end{aligned} \quad (6.8)$$

Os termos ψ_1 , ψ_2 e ψ_3 da equação 6.8 são coeficientes experimentalmente determinados, correlacionados às funções K_1 , K_2 e K_3 , respectivamente. São parâmetros de indentação que dependem das propriedades de deformação plástica localizada do material, da geometria do indentador e da força de indentação.

Giannakopoulos e Suresh (1997) propuseram uma equação que descreve o campo de deslocamento radial de um material livre de tensões residuais, abaixo da indentação. Tal formulação foi baseada na solução da tensão produzida pela ação de uma carga concentrada atuando na borda de um corpo semi-infinito apresentada por Boussinesq (1885) (seção 3.2). Adaptando e aplicando a equação de Giannakopoulos e Suresh para o campo de deslocamento na superfície do material em torno da indentação, pôde-se observar experimentalmente que a equação a seguir representa bem o fenômeno físico estudado (SUTERIO, 2005):

$$u_r(r) = C \frac{\nu}{E(\nu - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\nu}-1}} \quad (6.9)$$

onde C é a constante que depende da força da indentação, da geometria da ponta do indentador e das propriedades do material. Esta constante pode ser determinada pelo método dos mínimos quadrados através de dados experimentais do campo de deslocamentos radiais após a indentação de um material livre de tensões residuais.

Desta forma foi proposto um modelo completo, relacionando as tensões residuais ao campo de deslocamentos radiais, conforme segue (SUTERIO, 2005):

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left[\left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} - \left(\frac{1+\vartheta}{2E}\right) \frac{K_3}{r^3}\right] \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\vartheta}{E(\vartheta - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\vartheta}-1}} \quad (6.10)$$

onde K_4 é equivalente à constante C na equação 6.9, determinada a priori em um material livre de tensões residuais.

6.2.2 Modelos derivados do método do furo cego

O terceiro modelo proposto parte do método do furo cego. Observando-se a equação 6.6, a mesma analogia utilizada anteriormente pode ser aplicada. A componente radial do campo de deslocamento (u_r), em termos de coordenadas polares, pode ser escrita da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.11)$$

onde K_1 e K_2 são funções desconhecidas, dadas por:

$$\begin{aligned} K_1 &= H[(\sigma_1 + \sigma_2), \psi_1] \\ K_2 &= \Gamma[(\sigma_1 - \sigma_2), \psi_2] \end{aligned} \quad (6.12)$$

Os termos ψ_1 e ψ_2 nas funções da equação 6.12 são definidos como os da equação 6.8.

Mais uma vez, pode-se observar que o termo que depende de $\cos(2\theta)$ está correlacionado à diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) e o termo independente de θ , está correlacionado à soma das tensões principais ($\sigma_1 + \sigma_2$), do mesmo modo apresentado na equação 6.7.

Aplicando a equação modificada de Giannakopoulos e Suresh (1997) (equação 6.9), a equação 6.11 pode ser reescrita de uma forma mais completa, ou seja:

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\vartheta}{E(\vartheta - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\vartheta}-1}} \quad (6.13)$$

As equações 6.7, 6.10, 6.11 e 6.13, são estudadas e analisadas no capítulo 7. Em resumo, são desenvolvidos nesta seção quatro modelos matemáticos a serem usados em ensaios com carregamento controlado. As equações 6.7 e 6.11 não levam em conta o campo de deslocamentos ao redor da indentação em um material livre de tensões residuais, e por isto, são usadas em imagens resultantes da subtração deste campo previamente simulado. Já as equações 6.10 e 6.13 são propostas para aplicação direta em imagens resultantes dos ensaios de indentação, pois já levam em conta os efeitos isolados da indentação em um material livre de tensões residuais.

6.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MATEMÁTICOS E TENSÕES PRINCIPAIS

Neste item é mostrado o procedimento dos cálculos matemáticos, transformando-se os deslocamentos radiais quantificados pelo cabeçote de medição em valores de tensões residuais. Como exemplo, será analisada a equação 6.7

Adicionando as componentes de translação em relação a imagem, a equação 6.7 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left[\left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} - \left(\frac{1+\vartheta}{2E}\right) \frac{K_3}{r^3}\right] \cos(2\theta - 2\beta) + T_x \cos\theta + T_y \sin\theta \quad (6.14)$$

onde:

K₁, **K₂** e **K₃** são as constantes de indentação a determinar;

Os coeficientes **T_x** e **T_y** são os deslocamentos de corpo rígido nas direções das coordenadas cartesianas da imagem.

6.3.1 Modelo para regressão linear

A análise para ajuste, que utiliza o método dos mínimos quadrados, é baseada nos princípios apresentados por Suterio (Apêndice D- Regressão linear e incertezas para ajuste de modelos pelo método dos mínimos quadrados, 2005), desenvolvidos a seguir:

Reescrevendo a equação 6.14, tem-se:

$$u_r(r, \theta) = A \frac{K_1}{r} + \left[B \frac{K_2}{r} + C \frac{K_3}{r^3} \right] \cos(2\theta - 2\beta) + T_x \cos\theta + T_y \sin\theta \quad (6.15)$$

onde:

$$A = \left(\frac{1 + \nu}{2E} \right); \quad B = \frac{2}{E}; \quad C = -A$$

Aplicando as transformações trigonométricas em $\cos(2\theta - 2\beta)$, como sendo $(\cos 2\theta \cos 2\beta - \sin 2\theta \sin 2\beta)$ e a propriedade distributiva, obtém-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} u_r(r, \theta) = & A \frac{K_1}{r} + B \frac{K_2}{r} \cos 2\theta \cos 2\beta + C \frac{K_3}{r^3} \cos 2\theta \cos 2\beta - B \frac{K_2}{r} \sin 2\theta \sin 2\beta \\ & - C \frac{K_3}{r^3} \sin 2\theta \sin 2\beta + T_x \cos\theta + T_y \sin\theta \end{aligned} \quad (6.16)$$

Os cálculos na imagem iniciam com transformações de coordenadas cartesianas para coordenadas polares:

$$\begin{aligned} \cos(2\theta - 2\beta) &= \cos 2\theta \cos 2\beta + \sin 2\theta \sin 2\beta \\ \cos 2\theta &= \cos^2\theta - \sin^2\theta = \left(\frac{x}{r}\right)^2 - \left(\frac{y}{r}\right)^2 = \frac{x^2 - y^2}{r^2} \\ \sin 2\theta &= \sin\theta \cos\theta = \left(\frac{y}{r}\right) \cdot \left(\frac{x}{r}\right) = \frac{2xy}{r^2} \\ \cos(2\theta - 2\beta) &= \cos 2\beta \left(\frac{x^2 - y^2}{r^2} \right) + 2 \sin 2\beta \left(\frac{xy}{r^2} \right) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Assim o modelo de regressão pode ser reduzido da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 \quad (6.18)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 \beta_0 &= 0 & \beta_1 &= K_1 & x_1 &= \frac{A}{r} & \beta_2 &= K_2 \cos 2\beta & x_2 &= \frac{B}{r} \cos 2\theta \\
 \beta_3 &= K_3 \cos 2\beta & x_3 &= \frac{C}{r^3} \cos 2\theta & \beta_4 &= K_2 \sin 2\beta & x_4 &= -\frac{B}{r} \sin 2\theta \\
 \beta_5 &= K_3 \sin 2\beta & x_5 &= -\frac{C}{r^3} \sin 2\theta & \beta_6 &= T_x & x_6 &= \cos \theta \\
 & & \beta_7 &= T_y & x_7 &= \sin \theta
 \end{aligned}$$

A partir destes parâmetros encontrados e relacionando-os com as funções 6.8, a serem determinadas experimentalmente, pode-se determinar facilmente o valor das tensões principais σ_1 e σ_2 , e suas direções.

6.4 SOFTWARES DE CONTROLE E ANÁLISE

Devido ao período de atualização do programa computacional do sistema de medição usado neste trabalho, são utilizados dois aplicativos diferentes para a aquisição e processamento de dados. Ambos foram desenvolvidos (interface Visual Studio [“Microsoft Corporation”] – linguagem C#) no LabMetro através de adaptações realizadas em *softwares* já existentes, de medição e análise de tensões residuais pelo método do furo. Estes aplicativos são apresentados nas subseções que se seguem.

6.4.1 Programa computacional Indentation

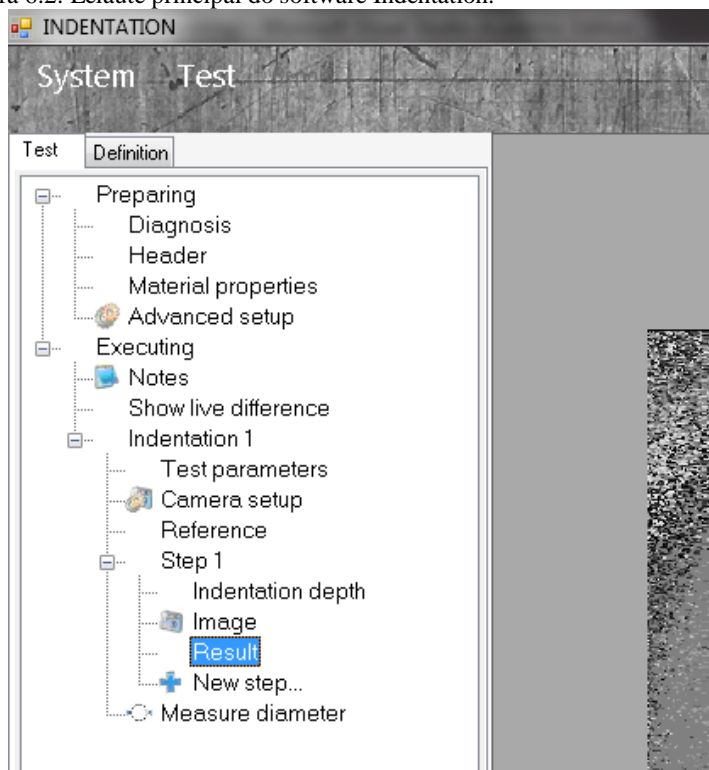
Para a aquisição de imagens, monitoramento e controle dos parâmetros de indentação é utilizado o *software* Indentation. Este programa conta com as seguintes características:

- salvar em arquivo texto os campos de deslocamentos radiais medidos;
- apresentar as coordenadas cartesianas da imagem em píxeis e apresentar as coordenadas cartesianas e polares em relação ao centro óptico ou ao centro do indentedor;

- comando da velocidade e direção do avanço do indentador, e da medição instantânea do seu deslocamento e força.

A figura 6.2 mostra uma parte da janela principal do programa Indentation:

Figura 6.2: Leiaute principal do software Indentation.



Fonte: Próprio autor.

Ao inicializar o programa Indentation, o usuário é direcionado passo a passo para a realização de um ensaio completo de indentação:

1º) **Diagnóstico:** situação da atividade do *hardware* de aquisição de imagem (câmera, diodo laser, atuador piezoelétrico, sinal de vídeo e placa multiplexadora);

2º) **Propriedades do material:** informações do material e suas propriedades mecânicas (coeficiente de Poisson, módulo de elasticidades e tensão de escoamento);

3º) **configurações avançadas:** opções relacionadas ao motor de passos (número de passos por volta, velocidade e limites de parada) e preferências de processamento de imagens, como o tamanho da área de medição, vetor sensibilidade e fator de escala de formação da imagem na superfície do material (mm/pixel);

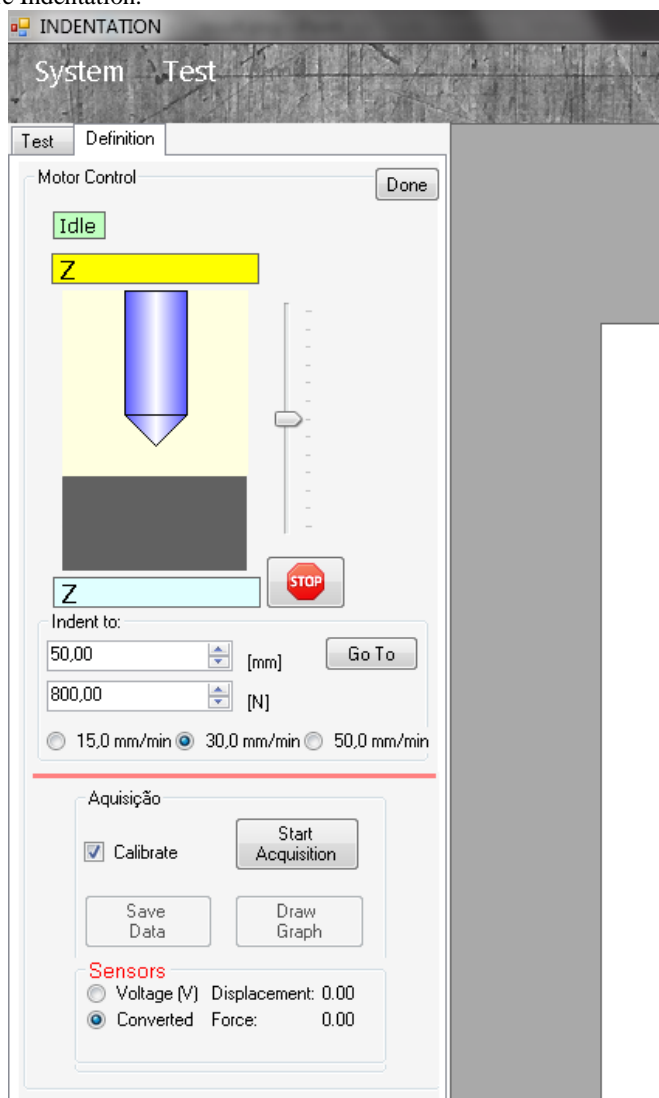
4º) **regulagens da câmera:** configuração dos parâmetros intensidade luminosa da imagem adquirida (ganho, *shutter*, brilho, *gamma*, contraste de franja e *sharpness*) e botões para centralização do eixo ótico em tela;

5º) **controle de indentação:** Controles automático e manual do motor de passos e mostrador da leitura de força e profundidade de indentação;

6º) **resultado:** Apresentação da imagem de diferença resultante da indentação no material.

A figura 6.3 mostra a parte principal da janela de configuração e controle da indentação do *software* Indentation:

Figura 6.3: Parte principal da tela de configuração e controle de indentação do software Indentation.

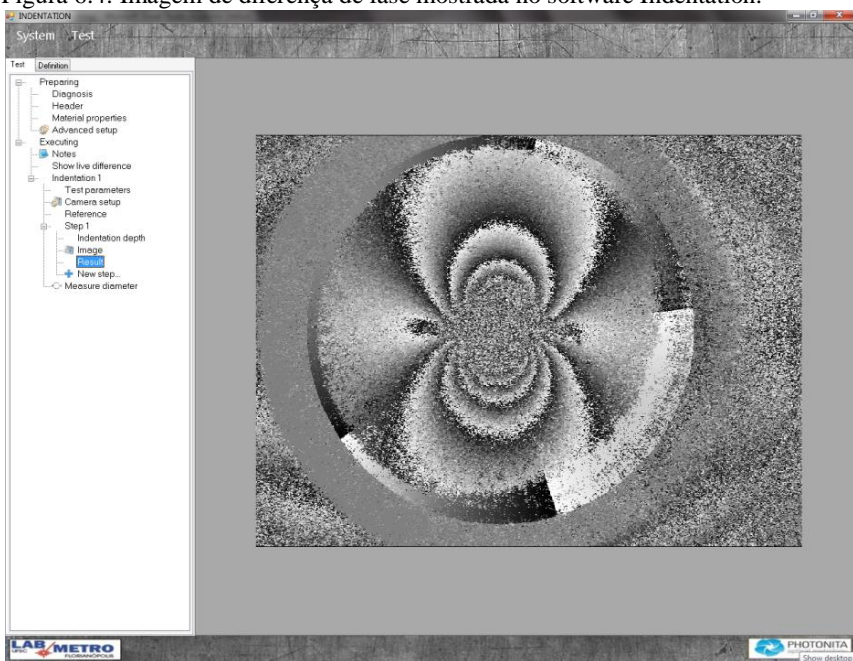


Fonte: Próprio autor.

Após o processamento realizado pelo programa, é mostrada a imagem de diferença de fase, sem o deslocamento de corpo rígido

(translação). A figura 6.4 mostra a interface do programa com uma imagem processada:

Figura 6.4: Imagem de diferença de fase mostrada no software Indentation.

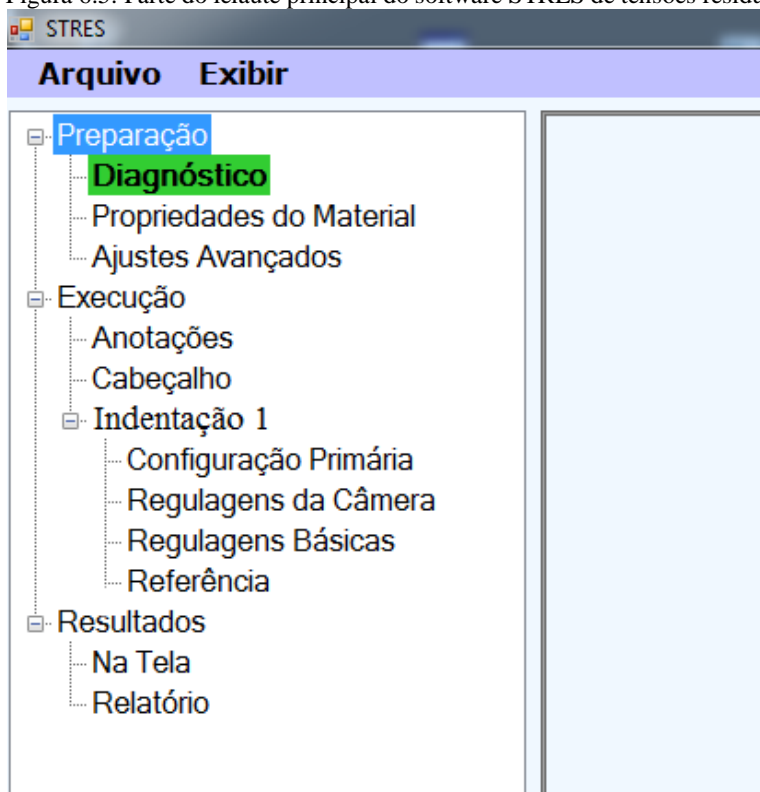


Fonte: Próprio autor.

6.4.2 Programa computacional STRES

Para o processamento e análise de imagens foi desenvolvido um programa, chamado de “STRES”, cuja tela principal é mostrada na figura 6.5:

Figura 6.5: Parte do leiaute principal do software STRES de tensões residuais.



Fonte: Próprio autor.

Atualmente o *software* de análise STRES é capaz de:

- processar as imagens conforme os modelos de regressão propostos para a indentação;
- apresentar, em forma gráfica, o deslocamento radial em dois perfis em duas direções ortogonais definidas pelo usuário;
- visualizar as imagens de mapa de fase, originais, processada e com remoção da translação de corpo rígido;
- quantificar e apresentar os resultados dos parâmetros de regressão;
- calcular o valor das tensões principais residuais e suas direções a partir da inserção dos parâmetros de regressão.

As figura 6.6 mostra a janela de configurações dos parâmetros de medição e janela de cálculo dos parâmetros relacionados às tensões principais:

Figura 6.6: Janelas do software STRES com configurações de parâmetros e cálculos de coeficientes relacionados de tensões residuais.

The screenshot displays the STRES software interface with two main windows open over the main application window.

Parâmetros do Ensaio (Test Parameters) Window:

Escala mm/pixel	0,00813
Sensibilidade mm/OF	0,00066
Raio do Furo	0,9
X do Centro	715,09
Y do Centro	565,47
R Min	1,7
R Max	3,36
E	200000
Poisson	0,29

Buttons: OK, Cancelar

Calculação (Calculation) Window:

Métodos de Cálculo (Calculation Methods):

- ☐ Método Original
- ☐ Set_indent
- ☐ Set_02Par
- ☐ Set_03Par
- ☒ Set_02Par_Indent
- ☐ Set_03Par_Indent

Constantes Calculadas (Calculated Constants):

K1	-396,09122044
K2	146,82066519
K3	
K4	536,78489558
Beta	-1,9842°
Alfa	118,0413°
Tx	-,0018
Ty	,0034
T	,0038

Simulação de Imagens (Image Simulation):

Simular Método Set_Indent (K4)

Gerar Imagem

Main Application Window (Visible behind):

Arquivo Exibir Processamento

Visualiza Tensões

Calcular Salvar Variáveis

Escala

20 Cancelar >>

Fonte: Próprio autor.

CAPÍTULO 7

7 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Os modelos para quantificação de tensões residuais, através de ensaios experimentais controlados, são avaliados e discutidos neste capítulo.

7.1 OS MODELOS MATEMÁTICOS DE CÁLCULO

A tabela 7.1 reapresenta todas as equações para cálculo do deslocamento radial, propostas por Suterio (2005) e apresentadas na seção 6.3:

Tabela 7.1: Identificação dos modelos matemáticos utilizados

Identificação do modelo de cálculo	Equação
Set_Indent	$u_r(r) = K_4 \frac{\vartheta}{E(\vartheta - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\vartheta}-1}}$
Set_02Par	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1 + \vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta)$
Set_03Par	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1 + \vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left[\left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} - \left(\frac{1 + \vartheta}{2E}\right) \frac{K_3}{r^3}\right] \cos(2\theta - 2\beta)$
Set_02Par_Indent	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1 + \vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\vartheta}{E(\vartheta - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\vartheta}-1}}$
Set_03Par_Indent	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1 + \vartheta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left[\left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} - \left(\frac{1 + \vartheta}{2E}\right) \frac{K_3}{r^3}\right] \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\vartheta}{E(\vartheta - 1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\vartheta}-1}}$

FONTE: Próprio autor.

Deve-se ressaltar que todos os ensaios foram realizados com carregamentos uniaxiais em que a direção principal de tensão é sempre a mesma. Além disto, a linha de aplicação da carga no corpo de prova tem a mesma direção do eixo horizontal da imagem na tela do computador.

7.2 MEDIDAS EM MATERIAS LIVRES DE TENSÕES

Com a intenção de escolher o critério de parada da indentação, ou seja, se seria realizada por carga ou profundidade a ser atingida, foram realizados ensaios em um corpo de prova de aço SAE 1020 livre de tensões residuais, segundo o tratamento térmico descrito na seção 5.1.5. Assim, são feitos vários ensaios de indentação com carga controlada e outros com profundidade regulada, e confrontados os resultados, tendo como elemento quantificador o diâmetro médio da marca de indentação.

Em todas as condições os testes com carga controlada foram mais repetitivos do que os com profundidade controlada. A tabela 7.2 apresenta a comparação de repetitividade, em termos do desvio padrão do diâmetro da marca de indentação, para a profundidade de 0,15 mm e para a força de 900 N:

Tabela 7.2: Avaliação do critério de parada da indentação.

Tipo de indentador	Critério de parada (parâmetro controlado)	Valor	Número de repetições	Diâmetro médio (mm)	Desvio padrão (mm)
Esférico	Força	900 N	10	1,059	0,030
	Profundidade	0,15 mm		0,995	0,065

FONTE: Próprio autor.

Observando a tabela 7.2 fica clara a melhor repetitividade do critério de parada baseado na força de indentação regulada, sendo o seu desvio padrão praticamente duas vezes menor comparado ao do critério da profundidade controlada.

7.2.1 Modelo “Set_Indent”

A caracterização do campo de deslocamentos radiais superficiais do material, gerados pela indentação em um material livre de tensões, é feita pelo modelo “Set_Indent”. Uma vez conhecido o valor médio do parâmetro K_4 , é possível gerar imagens simuladas (sem

ruídos) com este, que servem para a subtração, e conseguinte geração de imagens utilizadas em outros modelos matemáticos.

A avaliação inicial da repetitividade mostrada na tabela 7.2 usa o valor de carga de indentação de 900 N. Devido ao fato de não se ter conseguido um apoio tão eficiente do corpo de prova montado no simulador de tensões uniaxiais, é adotada neste trabalho a carga de 820 N como critério de parada para cada ensaio de indentação.

De acordo com a teoria de contatos, a carga de indentação é diretamente proporcional ao deslocamento de material ao redor desta. Sabe-se também que quanto maior o campo de deslocamentos, maior a quantidade de franjas nas imagens de diferença de fase. Até certo limite, quanto maior esta quantidade de franjas, melhor a sensibilidade no cálculo dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados, pois há mais informação em cada imagem analisada. Baseando-se nisto, é feita uma comparação da repetitividade usando duas diferentes cargas de indentação: 500 N e 820 N. A tabela 7.3 mostra os resultados utilizando o modelo “Set_Indent”, no cálculo do parâmetro K_4 :

Tabela 7.3: Comparação da repetitividade para diferentes cargas de indentação, usando o método “Set_Indent” para o aço SAE 1020.

Tipo de indentador	Critério de parada	Número de repetições	K_4 médio	Desvio padrão/média
Esférico	Força =500 N	6	402,3 N	10,7%
Esférico	Força =820 N	6	550,2 N	8,6%

FONTE: Próprio autor.

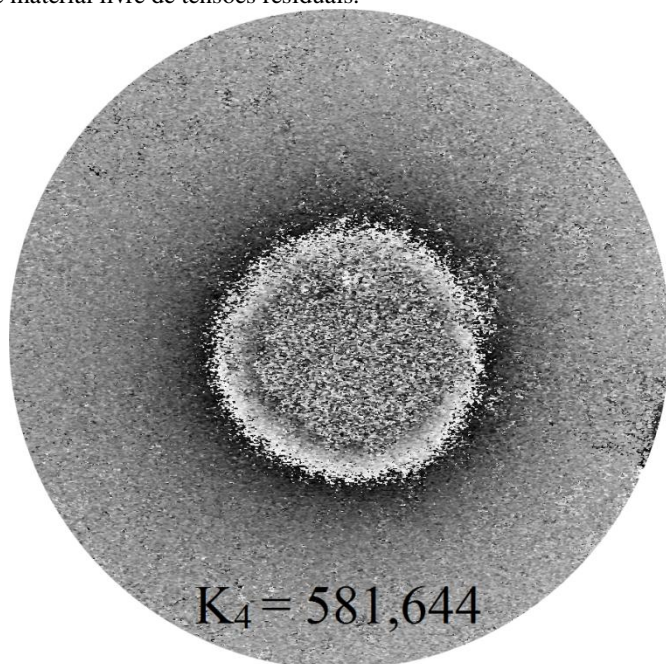
Analisando a tabela 7.3 observa-se que a repetitividade (razão do desvio padrão pela média) para a carga de 820 N é 20% menor (melhor) do que a da carga de 500 N. Além disto, o valor obtido de repetitividade para a carga de 820 N também é melhor do que o conseguido por Suterio (2005), que foi em torno de 10%, para o mesmo material avaliado e mesma ferramenta de indentação. Por outro lado, o equipamento usado por este possibilitava a aplicação de cargas mais elevadas, resultando em maior sensibilidade na medição dos parâmetros de cálculo.

Conforme Giannakopoulos e Suresh (1997) o parâmetro K_4 é a carga de indentação em um material livre de tensões residuais. Como os

resultados da tabela 7.3 indicam uma discrepância entre a carga lida pelo transdutor de força (820 N) e o valor médio de K_4 (550,2 N), constata-se que este termo possui mais graus de liberdade além da carga de indentação.

A figura 7.1 mostra uma imagem da indentação no aço com carga de 820N usada no cálculo do parâmetro K_4 :

Figura 7.1: Indentação em aço com ponta esférica de 2,5 mm diâmetro, carga de 820N e material livre de tensões residuais.



Fonte: Próprio autor.

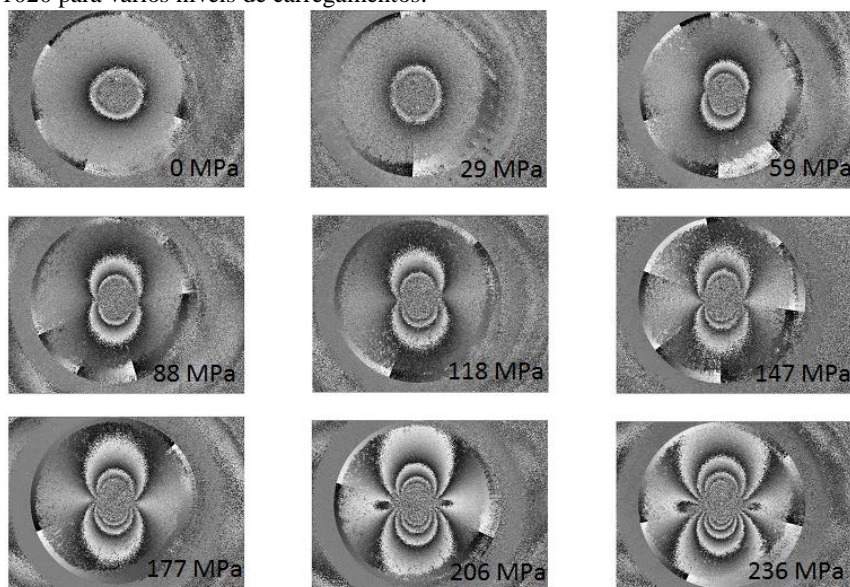
7.3 MEDIÇÕES COM TENSÃO CONTROLADA

Após a determinação do parâmetro K_4 , descrito na seção 7.2, com o material livre de tensões, é feita a aplicação de carga no corpo de prova de forma a simular diferentes níveis de tensões residuais uniaxiais. Para isto, é utilizado o simulador de tensões uniaxiais por tração pura, descrito na seção 5.5.1.1.

A faixa de cargas usadas nos ensaios controlados é de 0 a 80% da tensão de escoamento do aço SAE 1020, ou seja, de 0 a 236 MPa, com intervalos de 10% S_Y do material entre cada ponto medido. Após este estudo inicial (calibração), são escolhidos dois métodos de cálculo para uma análise mais específica.

A figura 7.2 mostra as imagens do mapa de fase (sem o salto de fase removido) geradas pelo deslocamento de material na superfície do corpo de prova, para diferentes níveis de tensões simulados:

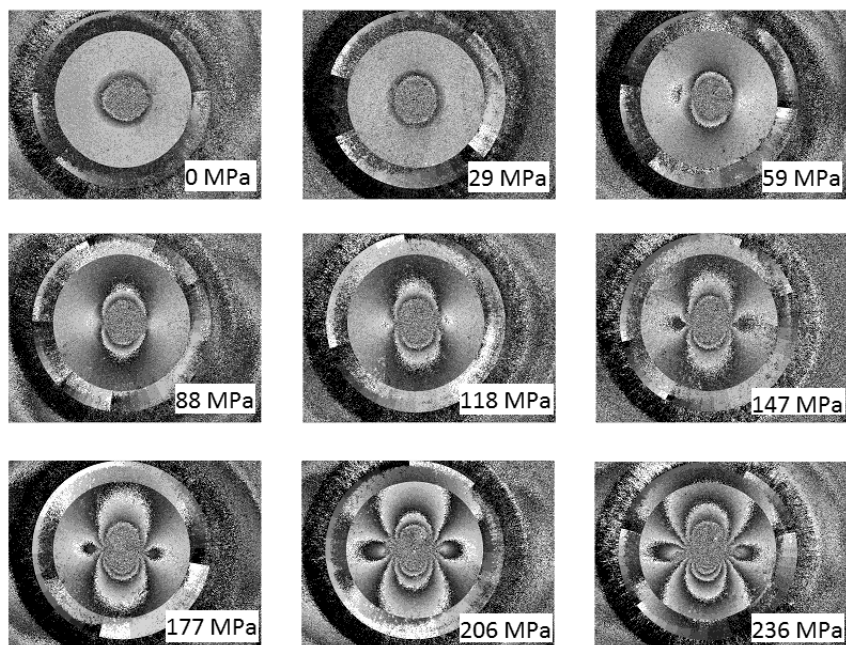
Figura 7.2: Imagens de diferença de fase obtidas da indentação do aço SAE 1020 para vários níveis de carregamentos.



Fonte: Próprio autor.

Já a figura 7.3 apresenta as mesmas imagens da figura 7.2 subtraídas do campo de deslocamentos radiais total da superfície do material livre de tensões residuais, gerado por uma indentação. Este campo é feito por imagens sintéticas geradas pelo modelo “Set_Indent” usando o parâmetro K_4 já calculado anteriormente (dado pela tabela 7.3):

Figura 7.3: Imagens da diferença entre o campo de deslocamento do material com tensão e o campo de deslocamento do material livre de tensões residuais, para vários níveis de carregamentos, no aço SAE 1020.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para cada modelo de cálculo (resumidos na tabela 7.1) estão apresentados nas seções seguintes. A simbologia apresentada em todas as tabelas é a seguinte:

- n = número de medidas repetidas realizadas no material numa mesma condição de carregamento, mas em posições diferentes no corpo de prova;
- ϵ_{ref} = deformação média de referência. Foi calculada através da média das deformações medidas nos dois extensômetros mais próximos da área de teste, instalados sobre o corpo de prova;
- σ_{ref} = tensão principal de referência. Calculada através da deformação média de referência,;
- β = parâmetro calculado pelo método dos mínimos quadrados e é o ângulo entre o eixo longitudinal da tela do computador até a tensão de maior intensidade no sentido anti-horário.

- K_1 , K_2 , K_3 e K_4 = parâmetros calculados pelo método dos mínimos quadrados de acordo com o modelo de cálculo adotado (ver a tabela 7.1).

7.3.1 Modelos “Set_02Par” e “Set_03Par”

Como já apresentado anteriormente, os modelos “Set_02Par” e “Set_03Par” (seção 6.3) são derivados do método do furo. Como já citado anteriormente, tais modelos não levam em conta o campo de deslocamentos superficiais gerados pela indentação em um material livre de tensões. Por isto, a imagem de diferença de fase de cada teste deve ser subtraída de uma imagem simulada pelo modelo “Set_Indent” usando o parâmetro K_4 (dado pela tabela 7.3). Em sequência, são obtidas imagens como as da figura 7.3, que por sua vez são usadas nos modelos matemáticos “Set_02Par” e “Set_03Par”.

A tabela 7.4 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set_02Par”:

Tabela 7.4: Parâmetros médios calculados para o modelo “Set_02Par” para o aço SAE 1020.

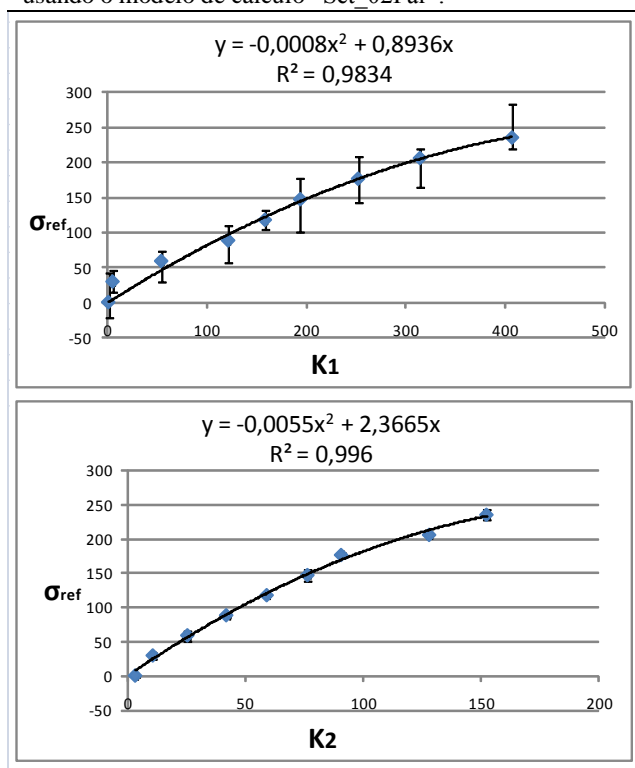
Modelo	n	$\varepsilon_{ref}(\mu m/m)$	$\sigma_{ref}(MPa)$	$\sigma_{ref}(\%S_y)$	$\beta(^{\circ})$	K1	K2	K3	K4
Set_02Par	6	0,00	0,00	0,0	3,82	1,35	3,44	0	550,17
	3	147,45	29,49	10,0	7,89	5,64	10,93	0	
	3	295,04	59,01	20,0	-3,19	54,48	25,60	0	
	3	442,57	88,51	30,0	-0,27	121,69	42,05	0	
	3	590,01	118,00	40,0	-0,38	158,55	59,21	0	
	3	737,54	147,51	50,0	-1,74	194,07	76,49	0	
	3	885,02	177,00	60,0	-4,22	252,08	90,76	0	
	3	1032,55	206,51	70,0	-1,57	314,20	128,08	0	
	3	1180,17	236,03	80,0	-1,53	406,63	152,38	0	

FONTE: Próprio autor.

Observando a tabela 7.4 nota-se que, exceto o ponto de 10% do S_y , em todas as faixas medidas os valores de β estão próximos de 0° , que é o valor teórico. O parâmetro K_4 não é calculado neste modelo, mas é indicado na tabela para mostrar que foi um mesmo valor usado em todas as imagens simuladas para a subtração das imagens de diferença de fase geradas por cada teste.

A figura 7.4 mostra os gráficos dos parâmetros calculados para o modelo “Set_02Par”, em função da tensão de referência. Em cada gráfico é apontada a equação da curva de regressão polinomial e o respectivo coeficiente de correlação ao quadrado.

Figura 7.4: Gráficos dos parâmetros K_1 e K_2 em função da tensão de referência, usando o modelo de cálculo “Set_02Par”.



Fonte: Próprio autor.

Os desvios padrão médios dos parâmetros do modelo de cálculo “Set_02Par” são:

- $sK_1 = 25,78$ unidades ($sK_1/K_{1m\acute{a}x} = 6,3\%$);
- $sK_2 = 5,56$ unidades ($sK_2/K_{2m\acute{a}x} = 3,7\%$).

A figura 7.4 mostra que para ambos os parâmetros K_1 e K_2 é feita uma regressão polinomial de 2º ordem, apontando ótima correlação ($R^2 > 0,98$) com a tensão de referência σ_{ref} . Além disto, o parâmetro K_2

apresenta melhor comportamento tanto em correlação quanto em repetitividade (desvio padrão de 3,7% do máximo valor do parâmetro) em relação a K_1 .

A tabela 7.5 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set_03Par”:

Tabela 7.5: Parâmetros médios calculados para o modelo “Set_03Par” para o aço SAE 1020.

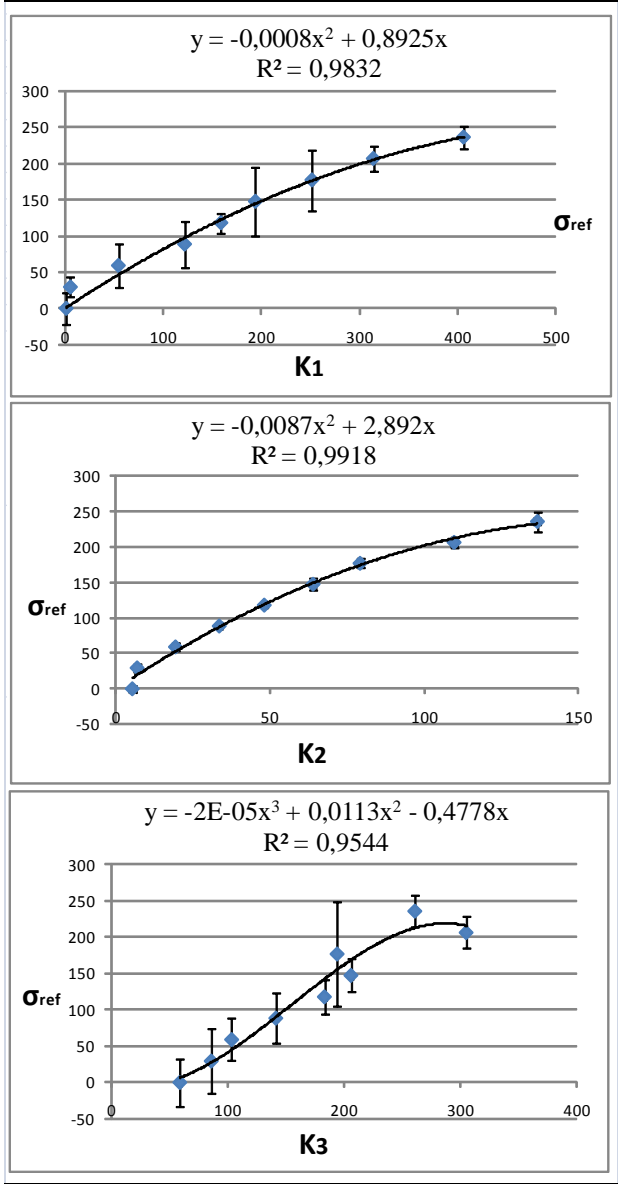
Modelo	n	ϵ_{ref} ($\mu m/m$)	σ_{ref} (MPa)	σ_{ref} (% S_y)	β (°)	K1	K2	K3	K4
Set_03Par	6	0,00	0,00	0,0	-0,8	1,30	5,30	59	550,17
	3	147,45	29,49	10,0	-19,5	5,60	6,88	86	
	3	295,04	59,01	20,0	-3,6	54,49	19,30	104	
	3	442,57	88,51	30,0	-0,6	121,93	33,48	142	
	3	590,01	118,00	40,0	-0,6	158,97	48,07	183	
	3	737,54	147,51	50,0	-1,5	194,07	63,89	206	
	3	885,02	177,00	60,0	-4,1	251,70	79,12	194	
	3	1032,55	206,51	70,0	-1,2	314,22	109,60	305	
	3	1180,17	236,03	80,0	-1,6	406,11	136,61	261	

FONTE: Próprio autor.

Analisando-se a tabela 7.5 nota-se que, como no modelo de cálculo “Set_02Par”, exceto no ponto de 10% do S_y , em todas as faixas medidas os valores de β são muito próximos de 0°. O parâmetro K_4 também não é calculado neste modelo, é apenas indicado.

A figura 7.5 indica os gráficos dos parâmetros calculados para o modelo “Set_03Par”, em função da tensão de referência. Em cada gráfico é mostrada a equação da curva de regressão polinomial e o respectivo coeficiente de correlação ao quadrado.

Figura 7.5: Gráficos dos parâmetros **K₁**, **K₂** e **K₃** em função da tensão de referência, usando o modelo de cálculo “Set 03Par”.



Fonte: Próprio autor.

Os desvios padrão médios dos parâmetros do modelo de cálculo “Set_03Par” são:

- $sK_1 = 25,79$ unidades ($sK_1/K_{1m\acute{a}x} = 6,4\%$);
- $sK_2 = 6,41$ unidades ($sK_2/K_{2m\acute{a}x} = 4,7\%$);
- $sK_3 = 33,73$ unidades ($sK_3/K_{3m\acute{a}x} = 11,1\%$).

Como a figura 7.5 aponta, para os parâmetros K_1 e K_2 é feita uma regressão polinomial de 2º ordem, gerando-se uma ótima correlação ($R^2 > 0,98$) com a tensão de referência σ_{ref} , mas para o parâmetro K_3 é realizada uma regressão polinomial de 3º ordem devido ao comportamento deste parâmetro ao longo da faixa avaliada. Novamente, o parâmetro K_2 apresenta o melhor comportamento (desvio padrão de 4,7% em relação ao valor máximo do parâmetro). O parâmetro K_3 se mostra de baixa confiança para a determinação das tensões residuais, dada a sua baixíssima linearidade e repetitividade limitada.

Para ambos os modelos vistos nesta seção, o comportamento dos resultados alcançados é idêntico aos descritos por Suterio (2005), como a boa estabilidade do parâmetro K_2 e da instabilidade de K_3 , ambos correlacionados à subtração das tensões principais.

7.3.2 Modelos “Set_02Par_Indent” e “Set_03Par_Indent”

Os modelos “Set_02Par_Indent” e “Set_03Par_Indent” são modelos derivados do método do furo que levam em consideração a parcela do campo de deslocamentos em torno da indentação no material livre de tensões residuais. Desta forma, são utilizados no cálculo dos parâmetros, imagens de diferença de fase diretamente obtidas dos testes de indentação (similares às imagens apresentadas na figura 7.2).

Como em todos os ensaios a carga de indentação é conhecida e constante, o valor médio de K_4 (550,17N), para a carga utilizada (820N), é aplicado nestes dois modelos matemáticos.

A tabela 7.6 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set_02Par_Indent”:

Tabela 7.6: Parâmetros médios calculados para o modelo “Set_02Par_Indent” para o aço SAE 1020.

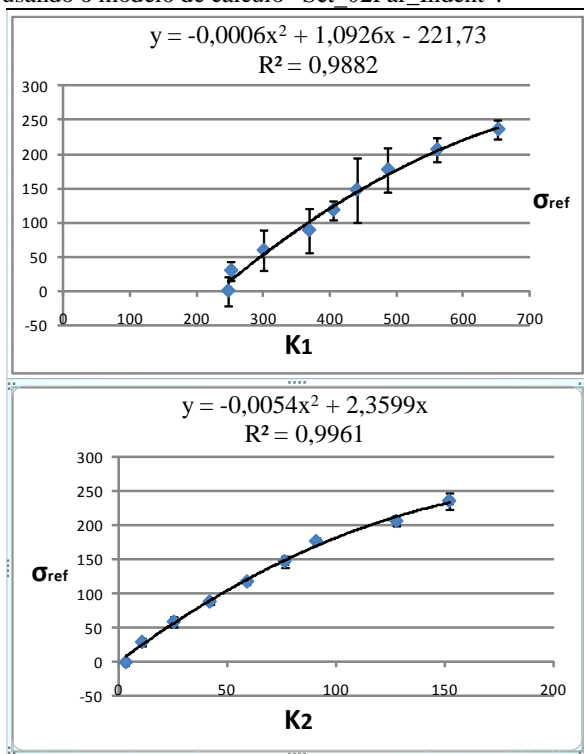
Modelo	n	$\sigma_{ref}(\mu m/m)$	$\sigma_{ref}(MPa)$	$\sigma_{ref}(\%S_y)$	$\beta(^{\circ})$	K1	K2	K3	K4
Set_02Par_Indent	6	0,00	0,00	0,00	6,83	247,29	3,48	0	550,17
	3	147,45	29,49	10,00	7,90	251,75	10,96	0	
	3	295,04	59,01	20,00	-3,19	300,46	25,59	0	
	3	442,57	88,51	30,00	-0,27	368,34	42,11	0	
	3	590,01	118,00	40,00	-0,37	404,70	59,32	0	
	3	737,54	147,51	50,00	-1,74	439,76	76,64	0	
	3	885,02	177,00	60,00	-4,39	486,80	91,16	0	
	3	1032,55	206,51	70,00	-1,58	560,38	128,14	0	
	3	1180,17	236,03	80,01	-1,54	651,97	152,46	0	

FONTE: Próprio autor.

A tabela 7.6 mostra, novamente, a tendência de estabilização dos valores de β em torno de 0° a partir de 20% do S_y .

A figura 7.6 apresenta os gráficos dos parâmetros calculados para o modelo “Set_02Par_Indent”, em função da tensão de referência. Em cada gráfico é mostrada a equação da curva de regressão polinomial e o respectivo coeficiente de correlação ao quadrado.

Figura 7.6: Gráficos dos parâmetros K_1 e K_2 em função da tensão de referência, usando o modelo de cálculo “Set_02Par_Indent”.



Fonte: Próprio autor.

Os desvios padrão médios dos parâmetros do modelo de cálculo “Set_02Par_Indent” são os seguintes:

- $sK_1 = 24,68$ unidades ($sK_1/K_{1m\acute{a}x} = 3,8\%$);
- $sK_2 = 5,66$ unidades ($sK_2/K_{2m\acute{a}x} = 3,7\%$);

Observando-se a figura 7.6, vê-se novamente que para todos os parâmetros é feita uma regressão polinomial de 2º ordem, gerando-se uma excelente correlação ($R^2 > 0,99$) com a tensão de referência σ_{ref} apenas para K_2 . O parâmetro K_1 apresenta uma ótima correlação ($R^2 = 0,99$), baixa linearidade e praticamente a mesma repetitividade relativa ($\cong 3,7$ unidades).

A tabela 7.7 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set_03Par_Indent”:

Tabela 7.7: Parâmetros médios calculados para o modelo “Set_03Par_Indent” para o aço SAE 1020.

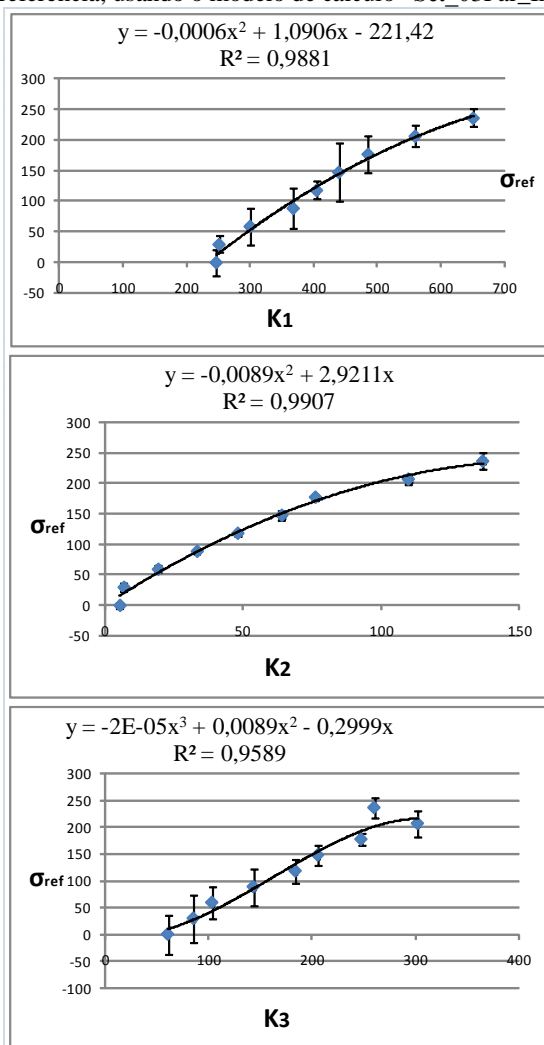
Modelo	n	$\epsilon_{ref}(\mu m/m)$	$\sigma_{ref}(MPa)$	$\sigma_{ref}(\%S_y)$	$\beta(^{\circ})$	K1	K2	K3	K4
Set_03Par_Indent	6	0,00	0,00	0,00	0,23	247,24	5,45	60,68	550,17
	3	147,45	29,49	10,00	-19,62	251,74	6,90	85,49	
	3	295,04	59,01	20,00	-3,64	300,61	19,32	103,40	
	3	442,57	88,51	30,00	-0,62	368,41	33,41	143,56	
	3	590,01	118,00	40,00	-0,58	405,08	48,11	184,09	
	3	737,54	147,51	50,00	-1,51	440,02	64,05	205,86	
	3	885,02	177,00	60,00	-4,28	486,19	76,20	247,79	
	3	1032,55	206,51	70,00	-1,24	560,27	109,84	302,47	
	3	1180,17	236,03	80,01	-1,50	651,53	136,78	260,34	

FONTE: Próprio autor.

Como em todos os outros modelos de cálculo, é mostrada pela tabela 7.7 a tendência de equilíbrio dos valores de β em torno de 0° a partir de 20% do S_y .

A figura 7.7 expõe os gráficos dos parâmetros calculados para o modelo “Set_03Par_Indent”, em função da tensão de referência. Em cada gráfico é mostrada a equação da curva de regressão polinomial e o respectivo coeficiente de correlação ao quadrado.

Figura 7.7: Gráficos dos parâmetros K_1 , K_2 e K_3 em função da tensão de referência, usando o modelo de cálculo “Set_03Par_Indent”.



Fonte: Próprio autor.

Os desvios padrão médios dos parâmetros do modelo de cálculo “Set_03Par_Indent” são os seguintes:

- $sK_1 = 24,53$ unidades ($sK_1/K_{1m\acute{a}x} = 3,8\%$);

- $sK_2 = 6,09$ unidades ($sK_2/K_{2m\acute{a}x} = 4,5\%$);
- $sK_3 = 26,89$ unidades ($sK_3/K_{3m\acute{a}x} = 8,9\%$);

Observa-se na figura 7.7 que, mais uma vez, para os parâmetros K_1 e K_2 é feita uma regressão polinomial de 2º ordem, gerando-se uma ótima correlação ($R^2 \geq 0,99$) com a tensão de referência σ_{ref} , e para o parâmetro K_3 é realizada uma regressão polinomial de 3º ordem resultando em uma boa correlação também ($R^2 = 0,96$). O parâmetro K_3 se mostra pouco repetitivo (com desvio padrão de 8,9% do máximo valor) se comparado ao parâmetro K_2 , que possui um desvio padrão de 4,5% do máximo valor. O parâmetro K_1 se comporta de maneira idêntica ao calculado pelo modelo “Set_02Par_Indent”.

7.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na seção 7.3 são apresentados os resultados da avaliação dos parâmetros determinados a partir do método dos mínimos quadrados para cinco diferentes modelos de cálculo, sendo que quatro destes são usados em corpos de prova com carregamento controlado. Analisando esta seção como um todo, chega-se às seguintes conclusões:

- O parâmetro K_2 é o mais repetitivo, com melhor linearidade e melhor correlação ($R^2 > 0,99$) dentre todos os analisados, sofrendo mínimas alterações de um método para outro;
- Uma particularidade importante pode ser notada observando-se as figuras 7.4, e 7.6: a equação de regressão do parâmetro K_2 é praticamente a mesma para modelos que utilizam diferentes tipos de imagem (com e sem subtração do campo de deslocamentos), fato também observado por Suterio (2005). Isto mostra que esta função é constante para os modelos “Set_02Par” e “Set_02Par_Indent”;
- O parâmetro K_1 tem média repetitividade (pelo menos 35% a mais do que o parâmetro K_2), média linearidade e uma ótima correlação para todos os modelos, tendo os melhores resultados para os métodos “Set_02Par_Indent” e “Set_03Par_Indent”;
- A função K_3 possui média repetitividade (no mínimo o dobro do parâmetro K_2), média linearidade e uma ótima correlação ($R^2 > 0,95$);

- O valor médio de β é obtido com menor erro para carregamentos a partir de 20% do limite de escoamento para o aço SAE 1020.

Em relação ao trabalho de Suterio (2005) há dois diferentes procedimentos experimentais introduzidos neste trabalho.

A primeira prática é referente ao uso de apenas dois extensômetros centrais no corpo de prova para a medição da deformação. Este procedimento adotado faz com que a parcela de incerteza referente às variações da medição de deformação seja sensivelmente reduzida, em relação ao uso das medições de todos os dez extensômetros, se as indentações forem todas realizadas na parte central do corpo de prova. Isto pode ser feito devido ao fato de que, em um carregamento de tração pura, as tensões são mais homogêneas em regiões mais afastadas do ponto de aplicação da carga (HIBBELER, 2010).

Para melhorar a qualidade das imagens de medição na avaliação de tensões residuais de aços, usando o cabeçote óptico interferométrico, é necessário utilizar uma fina camada de tinta branca na superfície do material. Mas ao mesmo tempo em que isto melhora a qualidade da informação captada pela câmera, suspeita-se que esta camada também possa dissimular o real campo de deslocamentos superficiais do material ao redor da indentação. A segunda nova prática implementada neste trabalho consiste no uso de uma camada de tinta na superfície do corpo de prova com cerca da metade da espessura até então convencionalmente utilizada para os métodos da indentação e do furo no LabMetro. Em contrapartida, quanto mais fina a camada de tinta, mais ruído é adicionado nas imagens resultantes.

A redução da espessura da camada de tinta tem influência muito marcante na melhora repetitividade do sistema de medição de tensões residuais em função de melhor se medir a movimentação real da superfície metálica. Este efeito é mais intenso no parâmetro K_1 , dada a sua alta sensibilidade a variação, e mais atenuado no parâmetro ligado à subtração das tensões principais (K_2).

Traçando um paralelo com os resultados alcançados por Suterio (2005), é feita uma comparação, mostrada na tabela 7.8, do desvio padrão médio para os parâmetros K_1 e K_2 para cada modelo matemático:

Tabela 7.8: Comparação dos resultados de desvio padrão médio para os parâmetros K_1 e K_2 para o aço SAE 1020.

Método	Atual trabalho		Suterio (2005)	
	$s_{\text{méd}}K_1$	$s_{\text{méd}}K_2$	$s_{\text{méd}}K_1$	$s_{\text{méd}}K_2$
Set_02Par	25,78	5,56	58,06	6,58
Set_03Par	25,79	6,41	58,05	8,13
Set_02Par_Indent	24,68	5,66	51,11	6,46
Set_03Par_Indent	24,53	6,09	51,47	8,34

FONTE: Próprio autor e Suterio (2005).

A tabela 7.8 mostra que os resultados de repetitividade média de K_1 neste trabalho são no mínimo 55,6% menores que os apresentados por Suterio (2005). O parâmetro K_2 tem um valor de desvio padrão médio de pelo menos 12,5% menor para o trabalho atual. Além disso, existem dois pontos a serem considerados também a respeito da comparação dos resultados desta tabela:

- Os melhores resultados de repetitividade média no atual trabalho podem indicar que a melhor repetitividade de aplicação de carga deste sistema aliada à menor influência, decorrente do uso de menor espessura, da camada de tinta realmente gerem menos variação na medição dos parâmetros K_1 e K_2 ;

- A existência de um mau condicionamento matemático nos modelos “Set_02Par_Indent” e “Set_03Par_Indent” descrito por Suterio (2005), fazia com que houvesse uma competição numérica entre os parâmetros K_1 e K_4 , quando estes eram calculados através de uma regressão linear feita pelo método dos Mínimos Quadrados, e que resultava em uma grande variabilidade nos valores gerados. No atual trabalho, com uso do valor médio de K_4 , este problema é contornado.

Concluindo a análise desta etapa, os modelos “Set_02Par_Indent” e “Set_03Par_Indent” possuem os melhores valores de correlação e de repetitividade para os parâmetros de cálculo.

7.4.1 Determinação das tensões residuais

Para a determinação das tensões residuais são escolhidos dois métodos: o com melhor comportamento estudado na seção 7.3.1,

chamado “Set_02Par”; e o com melhor comportamento avaliado na seção 7.3.2, denominado “Set_02Par_Indent”.

Como mostrado pela equação 6.8, os parâmetros \mathbf{K}_1 e \mathbf{K}_2 são funções da soma e diferença, respectivamente, entre tensões principais σ_1 e σ_2 . Como neste trabalho, a curva de resposta desses parâmetros é regida por uma regressão polinomial de 2º ordem, as suas respectivas funções inversas de correlação \mathbf{H} e $\mathbf{\Gamma}$ podem ser representadas por:

$$H(K_1, \psi_{1i}) = \psi_{13} K_1^2 + \psi_{12} K_1^1 + \psi_{11} K_1^0 = (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (7.1)$$

$$\Gamma(K_2, \psi_{2i}) = \psi_{23} K_2^2 + \psi_{22} K_2^1 + \psi_{21} K_2^0 = (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7.2)$$

Onde: ψ_{1i} e ψ_{2i} , são os coeficientes experimentalmente determinados, através da regressão polinomial, para \mathbf{K}_1 e \mathbf{K}_2 respectivamente.

Utilizando-se a equação da curva de regressão da figura 7.4, as equações 7.1 e 7.2, para o modelo “Set_02Par”, ficam:

$$H(K_1) = -0,0008K_1^2 + 0,8936K_1 \quad (7.3)$$

$$\Gamma(K_2) = -0,0055K_2^2 + 2,3665K_2 \quad (7.4)$$

Empregando-se a equação da curva de regressão da figura 7.6, as equações 7.1 e 7.2, para o modelo “Set_02Par_Indent”, ficam:

$$H(K_1) = -0,0006K_1^2 + 1,0926K_1 - 221,73 \quad (7.5)$$

$$\Gamma(K_2) = -0,0054K_2^2 + 2,3599K_2 \quad (7.6)$$

Resolvendo o sistema linear composto pelas equações 7.1 e 7.2, obtêm-se:

$$\sigma_1 = \frac{(H + \Gamma)}{2} \quad (7.7)$$

$$\sigma_2 = \frac{(H - \Gamma)}{2} \quad (7.8)$$

As equações 7.7 e 7.8 são desenvolvidas para a medição de tensões residuais biaxiais para o método da indentação. Entretanto, a

forma como a tensão é simulada no corpo de prova (tração pura), neste trabalho, permite se desconsiderar o termo da segunda tensão principal. Fazendo-se isto, fica sendo suficiente o uso de apenas um parâmetro de cálculo para a determinação das tensões residuais uniaxiais.

Uma vez que o parâmetro K_2 é o que se comporta de forma mais linear e repetitiva entre todos os outros, em todos os modelos matemáticos avaliados, este é usado em uma segunda forma (versão) de cálculo proposto neste estudo. Utilizando-se da equação 7.2 e desprezando o termo σ_2 (que é sempre zero), obtêm-se:

$$\Gamma(K_2, \psi_{2i}) = \psi_{23}K_2^2 + \psi_{22}K_2^1 + \psi_{21}K_2^0 = \sigma_1 \quad (7.9)$$

A utilização da equação 7.9 torna o cálculo da tensão residual principal uniaxial mais robusto porque retira a parcela de erro gerada pelo uso parâmetro K_1 , dado o seu pior comportamento metrológico em relação ao parâmetro K_2 .

As subseções seguintes exploram e comparam o comportamento dos dois modelos propostos para o cálculo de tensões residuais.

7.4.1.1 Cálculo das tensões usando K_1 e K_2

Usando as equações 7.3 e 7.4 na equação 7.7, são calculados os valores da tensão principal σ_1 para o modelo “Set_02Par”, usando-se os parâmetros K_1 e K_2 . A tabela 7.9 mostra os resultados para a faixa de 0 a 80% do limite de escoamento do aço SAE 1020:

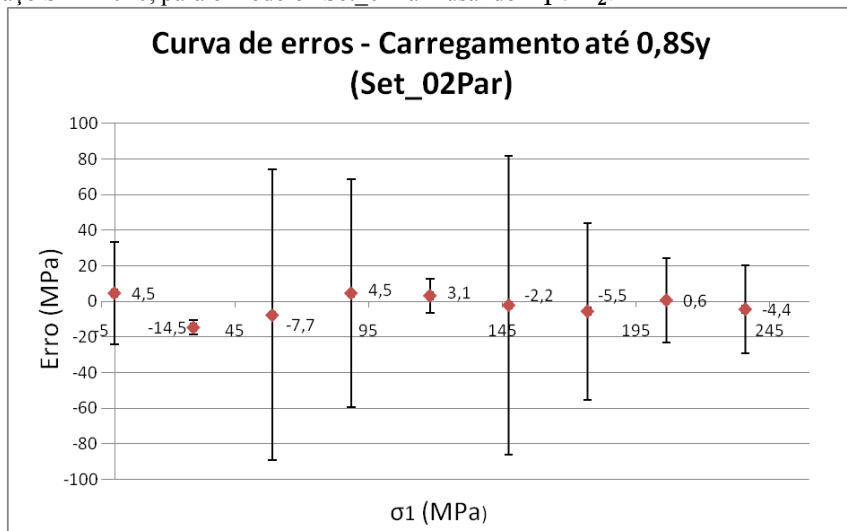
Tabela 7.9: Cálculo da tensão residual uniaxial simulada, para o modelo “Set_02Par” usando K_1 e K_2 , para o aço SAE 1020.

Método	σ_{ref} (%Sy)	σ_{ref} (MPa)	σ_1 (MPa)	Tendência (MPa)	Erro relativo (%)	Repetitividade (MPa)
Set_02Par	0,00	0,00	4,49	4,49	--	28,82
	10,00	29,49	20,26	-9,23	31,29	3,97
	20,00	59,01	54,01	-4,99	8,46	81,72
	30,00	88,51	94,18	5,66	-6,40	64,05
	40,00	118,01	122,16	4,15	-3,52	9,81
	50,00	147,51	147,05	-0,46	0,31	83,83
	60,00	177,00	175,04	-1,97	1,11	49,69
	70,00	206,51	214,53	8,02	-3,88	23,76
	80,01	236,03	246,84	10,81	-4,58	24,60
			Média	1,83	2,85	41,14

FONTE: Próprio autor.

A figura 7.8 mostra a curva de erros, construída a partir dos dados encontrados na tabela 7.9. Lembrando que a curva de erros mostra a tendência do ponto e não o erro absoluto, no eixo vertical (há diferenças entre valores positivos e negativos em relação à tabela 7.8). Isto é válido para todas as curvas de erros que se seguem.

Figura 7.8: Curva de erros para a faixa de até 80% da tensão de escoamento do aço SAE 1020, para o modelo “Set_02Par” usando K_1 e K_2 .



Fonte: Próprio autor.

A análise da tabela 7.9 e figura 7.8 revela que o erro máximo (tendência mais a repetitividade) identificado, encontra-se no ponto de 50% do limite do escoamento do material, possuindo um valor nominal de 83,4 MPa, o que representa uma incerteza (levando em conta somente a repetitividade) de 28,3% do S_y do material. Além disso, a máxima tendência encontrada é de 10,8 MPa (ponto de 80% do S_y do material).

A informação mais importante trazida pela análise da tabela 7.9 é a sobre a alta variabilidade dos valores de repetitividade ao longo de toda a faixa de medição. Em alguns pontos ela é excessivamente elevada e, em outros, permanece baixa. Como o autor não encontrou nenhuma causa externa deste efeito, passível de ser contornada no momento, foi adotada uma segunda abordagem na tentativa de melhor representar o

erro aleatório apresentado pelo sistema, caso estas causas pudessem ser evitadas. Ao invés de usar o desvio padrão de cada ponto é utilizado o desvio padrão do erro absoluto (ou resíduo). Tal medida indica melhor o comportamento médio da variabilidade do erro aleatório. A equação 7.10 mostra como é feito o cálculo da repetitividade do resíduo **Re_r** para a toda a faixa de pontos:

$$Re_r = t_{(95\%,n=3)} \cdot (\sigma_1 - \sigma_{ref}) \quad (7.10)$$

Dentro desta segunda abordagem, outro parâmetro também representativo do erro aleatório do sistema é a média dos resultados de repetitividade (**Re_{méd}**) para a toda a faixa de avaliação (tabela 7.9). A tabela 7.10 mostra os valores calculados dentro desta abordagem:

Tabela 7.10: Cálculo dos parâmetros de repetitividade, para o modelo “Set_02Par” usando **K₁** e **K₂**, para o aço SAE 1020.

Método	Re_r (MPa)	Re_{méd} (MPa)
Set_02Par	28,81	41,14

FONTE: Próprio autor.

Observando-se a tabela 7.10 nota-se que a repetitividade média é mais conservadora (42,8% maior) que a repetitividade do resíduo.

Em seguida, utilizando as equações 7.5 e 7.6 na equação 7.7, são calculados os valores da tensão principal **σ₁** para o modelo “Set_02Par_Indent”, usando-se os parâmetros **K₁** e **K₂**. A tabela 7.11 mostra os resultados para a faixa de 0% a 80% do limite de escoamento do aço SAE 1020:

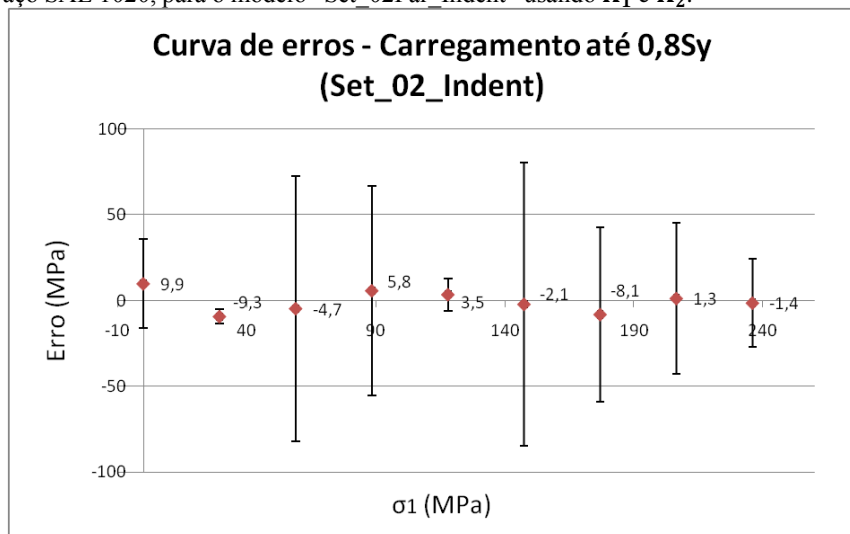
Tabela 7.11: Cálculo da tensão residual uniaxial simulada, para o modelo “Set_02Par_Indent” usando K_1 e K_2 , para o aço SAE 1020.

Método	σ_{ref} (%Sy)	σ_{ref} (MPa)	σ_1 (MPa)	Tendência (MPa)	Erro relativo (%)	Repetitividade (MPa)
Set_02Par_Indent	0,00	0,00	9,83	9,83	--	26,16
	10,00	29,49	20,17	-9,32	31,62	4,11
	20,00	59,01	54,34	-4,67	7,91	77,37
	30,00	88,51	94,32	5,81	-6,56	61,02
	40,00	118,01	121,53	3,53	-2,99	9,36
	50,00	147,51	145,37	-2,14	1,45	82,54
	60,00	177,00	168,89	-8,12	4,58	44,18
	70,00	206,51	207,77	1,26	-0,61	25,53
	80,01	236,03	234,61	-1,43	0,60	26,41
			Média	-0,58	4,50	39,63

FONTE: Próprio autor.

A figura 7.10 mostra a curva de erros, construída a partir dos dados encontrados na tabela 7.11:

Figura 7.10: Curva de erros para a faixa de até 80% da tensão de escoamento do aço SAE 1020, para o modelo “Set_02Par_Indent” usando K_1 e K_2 .



Fonte: Próprio autor.

A tabela 7.11 e figura 7.10 apresentam que o erro máximo (tendência mais a repetitividade) identificado encontra-se no ponto de 50% do limite do escoamento do material, possuindo um valor nominal de 80,40 MPa, o que representa uma incerteza (levando em conta somente a repetitividade) de 27,3% do S_y do material. Além disso, o máximo valor da tendência encontrado é de 9,83 MPa (ponto de 0% do S_y do material).

A tabela 7.12 mostra os resultados de repetitividade, através da segunda abordagem adotada neste trabalho:

Tabela 7.12: Cálculo dos parâmetros de repetitividade, para o modelo “Set_02Par_Indent” usando K_1 e K_2 , para o aço SAE 1020.

Método	Re_r (MPa)	$Re_{méd}$ (MPa)
Set_02Par_Indent	28,79	39,63

FONTE: Próprio autor.

A tabela 7.12 indica que a repetitividade média é mais conservadora (37,6% maior) que a repetitividade do resíduo.

7.4.1.2 Cálculo das tensões usando K_2

Usando as equações 7.4 na equação 7.9, são calculados os valores da tensão principal σ_1 para o modelo “Set_02Par”, usando-se o parâmetro K_2 . A tabela 7.13 mostra os resultados para a faixa de 0% a 80% do limite de escoamento do aço SAE 1020:

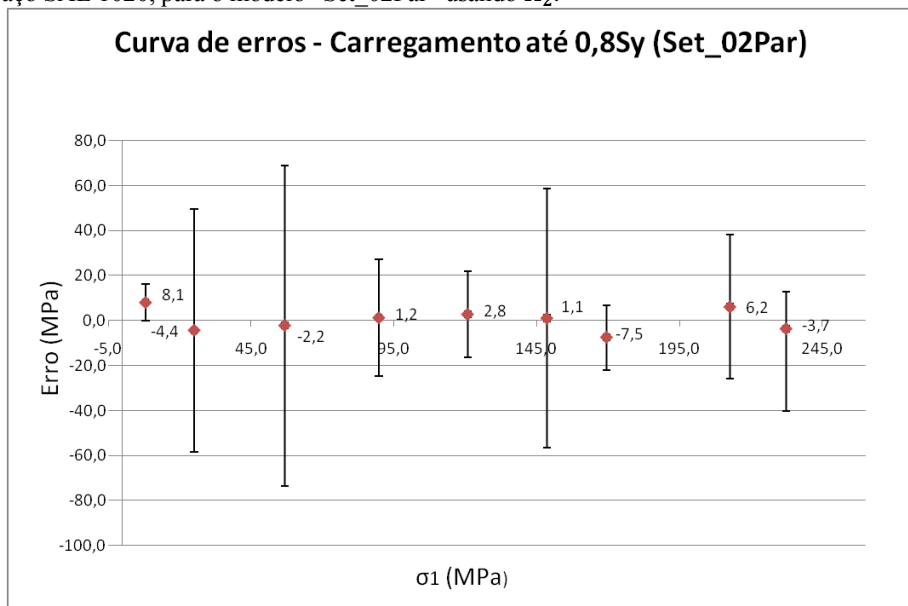
Tabela 7.13: Cálculo da tensão residual uniaxial simulada, para o modelo “Set_02Par” usando K_2 , para o aço SAE 1020.

Método	σ_{ref} (% S_y)	σ_{ref} (MPa)	σ_1 (MPa)	Tendência (MPa)	Erro relativo (%)	Repetitividade (MPa)
Set_02Par	0,00	0,00	8,08	8,08	--	8,25
	10,00	29,49	25,10	-4,39	14,88	54,08
	20,00	59,01	56,78	-2,23	3,78	71,26
	30,00	88,51	89,75	1,23	-1,39	25,90
	40,00	118,01	120,82	2,81	-2,38	19,11
	50,00	147,51	148,58	1,07	-0,72	57,59
	60,00	177,00	169,46	-7,55	4,26	14,37
	70,00	206,51	212,67	6,16	-2,98	31,84
	80,01	236,03	232,34	-3,70	1,57	36,67
			Média	0,16	2,13	35,46

FONTE: Próprio autor.

A figura 7.12 mostra a curva de erros, construída a partir dos dados encontrados na tabela 7.13:

Figura 7.12: Curva de erros para a faixa de até 80% da tensão de escoamento do aço SAE 1020, para o modelo “Set_02Par” usando K_2 .



Fonte: Próprio autor.

A análise da tabela 7.13 e figura 7.12 revela que o erro máximo (tendência mais a repetitividade) identificado, encontra-se no ponto de 20% do limite do escoamento do material, possuindo um valor nominal de 69,03 MPa, o que representa uma incerteza (levando em conta somente a repetitividade) de 23,4% do S_y do material. Além disso, a máxima tendência encontrada é de 8,1 MPa (ponto de 0% do S_y do material).

A tabela 7.14 mostra os resultados de repetitividade, através da segunda abordagem adotada neste trabalho:

Tabela 7.14: Cálculo dos parâmetros de repetitividade, para o modelo “Set_02Par” usando K_2 , para o aço SAE 1020.

Método	Re_r (MPa)	$Re_{méd}$ (MPa)
Set_02Par	23,15	35,46

FONTE: Próprio autor.

A tabela 7.14 indica que a repetitividade média é mais conservadora (53,1% maior) que a repetitividade do resíduo.

Em seguida, utilizando-se a equação 7.6 na equação 7.9, são calculados os valores da tensão principal σ_1 para o modelo “Set_02Par_Indent”, usando-se o parâmetro K_2 apenas. A tabela 7.15 mostra os resultados para a faixa de 0% a 80% do limite de escoamento do aço SAE 1020:

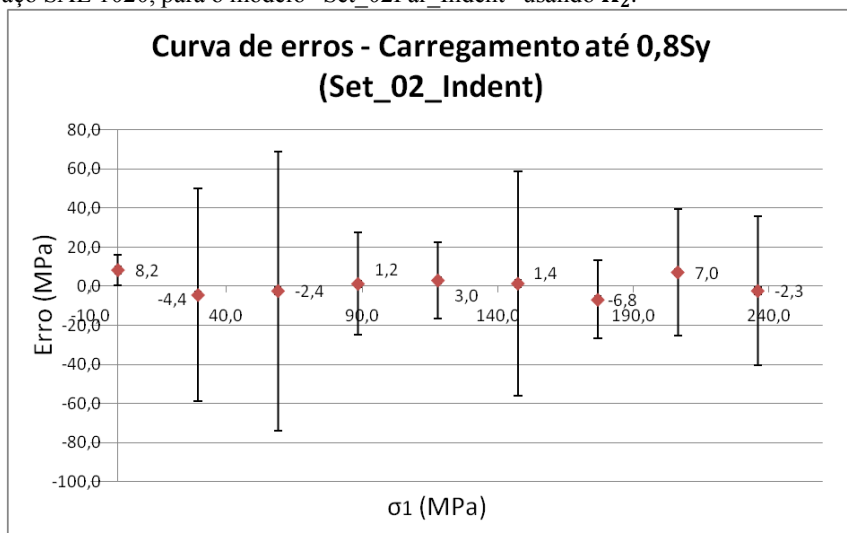
Tabela 7.15: Cálculo da tensão residual uniaxial simulada, para o modelo “Set_02Par_Indent” usando K_2 , para o aço SAE 1020.

Método	σ_{ref} (%Sy)	σ_{ref} (MPa)	σ_1 (MPa)	Tendência (MPa)	Erro relativo (%)	Repetitividade (MPa)
Set_02Par_Indent	0,00	0,00	8,13	8,13	--	7,91
	10,00	29,49	25,10	-4,39	14,87	54,31
	20,00	59,01	56,65	-2,35	3,99	71,38
	30,00	88,51	89,76	1,25	-1,41	26,09
	40,00	118,01	120,97	2,96	-2,51	19,42
	50,00	147,51	148,90	1,39	-0,94	57,49
	60,00	177,00	170,22	-6,79	3,83	20,03
	70,00	206,51	213,54	7,03	-3,40	32,20
	80,01	236,03	233,72	-2,31	0,98	37,94
			Média	0,55	1,93	36,31

FONTE: Próprio autor.

A figura 7.14 mostra a curva padrão de erros, construída a partir dos dados encontrados na tabela 7.15:

Figura 7.14: Curva de erros para a faixa de até 80% da tensão de escoamento do aço SAE 1020, para o modelo “Set_02Par_Indent” usando K_2 .



Fonte: Próprio autor.

A tabela 7.15 e figura 7.14 apresentam que o erro máximo (tendência mais a repetitividade) encontra-se no ponto de 20% do limite do escoamento do material, possuindo um valor nominal de 69,02 MPa, o que representa uma incerteza (levando em conta somente a repetitividade) de 23,4% do S_y do material. Além disso, a máxima tendência medida é de 10,6 MPa (ponto de 70% do S_y do material).

A tabela 7.16 mostra os resultados de repetitividade, através da segunda abordagem adotada neste trabalho:

Tabela 7.16: Cálculo dos parâmetros de repetitividade, para o modelo “Set_02Par_Indent” usando K_2 , para o aço SAE 1020.

Método	Re_r (MPa)	$Re_{méd}$ (MPa)
Set_02Par_Indent	22,75	36,31

FONTE: Próprio autor.

A tabela 7.16 indica que a repetitividade média é mais conservadora (59,6% maior) que a repetitividade do resíduo.

A análise superficial das tabelas 7.13 e 7.15, incluindo os valores de erros máximos calculados, mostra que ambos os métodos usando o somente o parâmetro K_2 fornecem resultados semelhantes, gerando praticamente o mesmo erro máximo (em torno de 69 MPa). Tal fato é esperado, já que suas equações de regressão polinomial para os métodos “Set_02Par” e “Set_02Par_Indent” são aproximadamente as mesmas.

7.4.2 Resumo das medições de tensões residuais uniaxiais

A subseção 7.4.1 apresenta e compara duas formas distintas de cálculo de tensões residuais uniaxiais, utilizando dois modelos matemáticos diferentes. A primeira usa dois parâmetros de cálculo: um dependente da soma das tensões principais σ_1 e σ_2 (K_1), e o outro em função da subtração destas tensões principais (K_2). A segunda forma utiliza apenas o parâmetro dependente da subtração das tensões principais (K_2).

Para a primeira forma de medição, o modelo “Set_02Par_Indent” se mostra com melhores valores de tendência e repetitividade médias, e para a segunda forma o modelo “Set_02Par” gera resultados bem pouco melhores.

A fim de comparar os resultados de repetitividade da tensão calculada σ_1 gerados pelos modelos “Set_02Par” e “Set_02Par_Indent” são realizados dois testes de hipóteses homocedásticos (variâncias consideradas similares) unilaterais, adotando-se um nível de significância de 5%. Os resultados destes testes mostram (valor-p $\geq 0,46$) que não se podem considerar os valores de repetitividade médias como diferentes para esses dois modelos de cálculo, tanto com o uso dos parâmetros K_1 e K_2 quanto no uso de somente o parâmetro K_2 . Desta forma, os modelos “Set_02Par” e “Set_02Par_Indent” geram resultados de repetitividade média semelhantes.

A tabela 7.17 apresenta a comparação dos resultados para ambas as formas de medição de tensões residuais uniaxiais para o modelo “Set_02Par”:

Tabela 7.17: Comparação dos modelos de medição da tensão residual simulada, para o modelo “Set_02Par”, para o aço SAE 1020.

σ_{ref} (%Sy)	Usando K1 e K2				Usando K2			
	Tendência (MPa)	Repetitividade (MPa)	Erro máx. (MPa)	Re _r	Tendência (MPa)	Repetitividade (MPa)	Erro máx. (MPa)	Re _r
0,00	4,54	28,82	83,36	28,81	8,13	8,25	69,03	23,15
10,00	-9,23	3,97			-4,39	54,08		
20,00	-4,99	81,72			-2,23	71,26		
30,00	5,66	64,05			1,23	25,90		
40,00	4,15	9,81			2,81	19,11		
50,00	-0,46	83,83			1,07	57,59		
60,00	-1,97	49,69			-7,55	14,37		
70,00	8,02	23,76			6,16	31,84		
80,01	10,81	24,60			-3,70	36,67		
Média	1,84	41,14			0,17	35,46		

FONTE: Próprio autor.

Analisando a tabela 7.17, observa-se que usando somente o parâmetro **K₂**, há uma queda de 17,2% do erro máximo, com uso do modelo “Set_02Par”. Especificamente, há uma diminuição de: 90,7% no valor médio da tendência, 13,8% na média de repetitividade e em 19,6% na repetitividade do resíduo. Neste caso também é realizado um teste de hipótese heterocedástico (variâncias consideradas diferentes) unilateral com relação à repetitividade, e o resultado (valor-p = 0,33) mostra que, usando um mesmo modelo, os valores de repetitividade média para as duas formas de cálculo podem ser considerados iguais para um nível de significância de 5%.

CAPÍTULO 8

8 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO

O capítulo 7 discute e avalia o comportamento do sistema de medição utilizando-se dados de calibração e diferentes modelos matemáticos, para a faixa de tensão de 0 até 236 MPa no aço SAE 1020. No presente capítulo são analisados os resultados para as medições independentes para dois estados de carregamento: (a) 50% e (b) 75% da tensão de escoamento do material. Para isto, é realizada uma análise metrológica do sistema de medição de tensões residuais por indentação. São considerados aspectos relacionados à medição da tensão de referência, ao modelo matemático, ao corpo de prova e ao cabeçote de medição óptico.

Como o modelo de cálculo “Set_02Par” gera os menores resultados de repetitividade média com o uso de somente um parâmetro de cálculo, este será o método utilizado neste capítulo.

Para o balanço de incertezas é usada uma abordagem mista. São determinados os intervalos de confiança de alguns parâmetros de medição e, a partir destes, avalia-se as incertezas da medição das tensões residuais. Além disto, são usados resultados obtidos por Suterio (2005) que são baseados em uma abordagem integral, em condições semelhantes às deste trabalho, em que um modelo matemático é aceito e as demais características de ensaio definidas. Finalmente, são determinadas as incertezas das tensões residuais obtidas pelo sistema de medição.

Ressalta-se que as condições de contorno de medição consideradas neste trabalho são: (1) carregamentos uniaxiais, (2) tensões residuais uniformes na superfície e ao longo da espessura do material, e (3) valores de incerteza expandida com um nível de confiança de 95%. Além disso, a terminologia adotada e o procedimento de cálculo de incertezas estão em conformidade com os praticados internacionalmente em: “O Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados” (VIM) (INMETRO, 2009), e o “Guia para Expressão da Incerteza de Medição” (INMETRO, 2003).

8.1 FONTES DE INCERTEZA

Para fins de análise de incertezas, foram considerados os seguintes elementos do sistema de medição por indentação e simulação de tensões residuais uniaxiais:

- Modelo matemático;
- *Softwares* de análise e controle;
- Cabeçote de medição óptico;
- Simulador de tensões uniaxiais;
- Corpo de prova;
- Medição de referência (deformação);

O resultado de medição, ou as grandezas de saída são: a tensão principal σ_1 e a direção das tensões principais (β).

Considerando todos estes elementos, são identificadas vinte e três fontes de incerteza, assim categorizadas e descritas:

Sistema de referência de medição de tensões

- Po: incerteza da correção de calibração da ponte amplificadora;
- Vd: variação da deformação;
- Fe: fator do extensômetro (fator *Gage*, ou fator *K*);
- Ep: erro de posicionamento dos extensômetros;

Sistema de simulação de tensões uniaxiais

- Vp: variações nas propriedades mecânicas do corpo de prova;
- Fcp: existência de flexão no corpo de prova decorrente da aplicação do carregamento, apoio sobre o sistema de simulação de tensões residuais e erros geométricos;
- Tra: Tensões residuais pré-existent e apoio sobre o sistema de simulação de tensões residuais;

Sistema de medição por indentação

- Re: repetitividade natural da medição;
- Res: resolução do cabeçote de medição óptico;
- V4: variabilidade da carga de indentação ou parâmetro

K_4 ;

- Ea: incerteza de ajuste de curva dos parâmetros K_1 e K_2 ;
- An: efeito do arredondamento numérico;
- Dx: descentralização da imagem no eixo horizontal “x”;
- Dy: descentralização da imagem no eixo vertical “y”;
- E: incerteza do valor do módulo de elasticidade real do material;
- Ev: incerteza do valor do coeficiente de Poisson real do material;
- Fi: fator de escala da imagem;
- Rc: razão de aspecto da câmera (razão entre as dimensões horizontal e vertical do pixel);
- Pi: posição do raio interno da área de medição;
- Pe: posição do raio externo da área de medição;
- Tx: deslocamento (translação) de corpo rígido no eixo horizontal “x”;
- Ty: deslocamento (translação) de corpo rígido no eixo vertical “y”;
- Ro: ruído óptico da imagem;

A incerteza devido ao apoio sobre o sistema de simulação de tensões residuais é computada duas vezes porque as componentes de incertezas **Fcp** e **Tra**, obtidas de trabalhos anteriores, levam em consideração este apoio e este autor não conseguiu isolar esta parcela em pelo menos um dos casos. Este uso é válido, visto que esta componente tem valor muito baixo em relação a outras parcelas de incerteza.

8.2 ANÁLISE METROLÓGICA

Como já exposto anteriormente, uma parte da análise metrológica é realizada usando parte de resultados de incerteza estimados por Suterio (2005). Estes resultados são alcançados através de simulação de variações típicas das fontes de incerteza nos parâmetros do *software* de análise, em função de especificações e medições previas em ensaios controlados. Resumidamente, é simulada uma imagem de referência usando um modelo matemático e, a partir desta imagem, são

aplicadas variações nos fatores de influência. Assim, pela análise estatística dos resultados obtêm-se o comportamento das grandezas de saída em função de cada variação dos parâmetros de entrada.

Os resultados retirados de Suterio (2005) usados na presente análise de incertezas são referentes ao ponto de medição de 177.1 MPa (60% do limite de escoamento do material) utilizando o modelo “Set_02Par_Indent”. Tais características são adequadas aos pontos de medição avaliados nesta seção, referentes às faixas de 50% e 75% do limite de escoamento do aço SAE 1020, e também para o uso no modelo “Set_02Par” (similar ao modelo “Set_02Par_Indent”).

A seguir são descritas mais especificamente a origem das estimativas de cada fonte de incerteza, empregadas nos balanços de incertezas:

- Po: incerteza da correção da última calibração realizada na ponte amplificadora;
- Vd: desvio padrão entre leituras de deformação;
- Fe: obtido da especificação contida no manual do fabricante;
- Ep: “estimado através da experiência em colagem de extensômetros” (SUTERIO, 2005, p. 103);
- Vp: “estimado através da literatura e referem-se às não homogeneidades das propriedades mecânicas ao longo de todo o corpo de prova” (SUTERIO, 2005, p. 103);
- Fcp: “obtido através de simulação de vigas apoiadas sobre diversos apoios e a tensão obtida devido ao seu peso próprio (SUTERIO, 2005, p. 103);
- Tra: estimado através da repetitividade de medições feitas com o corpo de prova descarregado, pelo sistema do furo associado à holografia eletrônica (PEIXOTO FILHO, 2004);
- Re: desvio padrão da tensão medida σ_1 ;
- V4: é a variação de σ_1 baseada no desvio padrão de K_4 , sendo este medido das imagens no material livre de tensões usando o modelo “Set_Indent”;
- Res: Características metrológicas do cabeçote de medição óptico (KAPP, 2010);
- Ea: desvio padrão do erro absoluto (resíduo) entre σ_{ref} e σ_1 ;
- An: incerteza numérica do modelo matemático devido à simulação de imagem e cálculo pelo método dos mínimos quadrados (SUTERIO, 2005, p. 103);
- Dx e Dy: “incerteza do centro óptico da imagem nas direções “x” e “y”, respectivamente” (SUTERIO, 2005, p. 103);

- E e Ev: incerteza média encontrada na literatura (SUTERIO, 2005);
- Fi: “obtidos através de ensaios de calibração do interferômetro radial.” (SUTERIO, 2005, p. 103)
- Rc: “estimado através de especificações de projeto do interferômetro [também válido para o atual interferômetro]” (SUTERIO, 2005, p. 103);
- Pi, Pe, Tx, Ty e Ro: “estimados em função da experiência do operador em diversos ensaios realizados” (SUTERIO, 2005, p. 103).

8.2.1 Avaliação da incerteza combinada

No capítulo 7 é obtida a curva de erros do sistema de medição de tensões residuais na faixa de até 80% da tensão de escoamento (S_y) para os diferentes modelos de cálculo. Nesta seção o desempenho do sistema é verificado de forma independente em dois pontos adicionais: 147,5 MPa (50% do S_y) e 221,3 MPa (75% do S_y). Embora nestes pontos as medições tenham sido feitas nas mesmas condições dos ensaios de teste descritos no capítulo 7, elas são independentes.

Uma verificação é feita usando o modelo “Set_02Par” nas suas duas versões: a primeira usando os parâmetros K_1 e K_2 , e a segunda usando somente o parâmetro K_2 .

A título de ilustração, é mostrado na tabela 8.1 o balanço de incertezas referente à verificação do ponto de 50% da tensão de escoamento (147,5 MPa) do aço SAE 1020, utilizando o modelo “Set_02Par” e usando dois parâmetros:

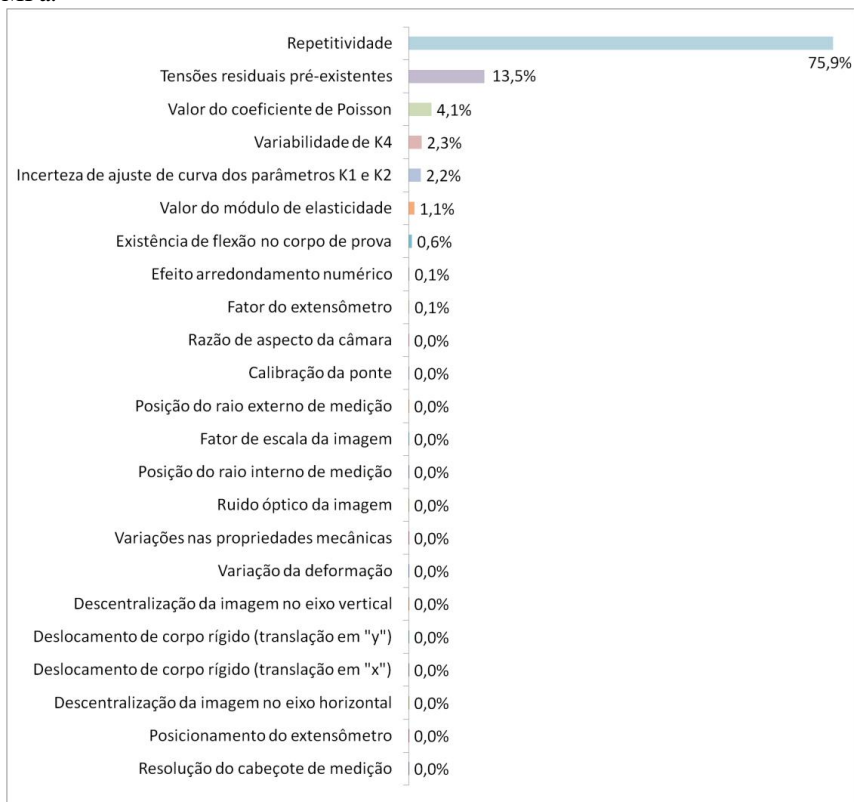
Tabela 8.1: Balanço de incertezas da verificação do ponto de 0,5S_y utilizando o modelo “Set_02Par”, para o aço SAE 1020.

Balanço de Incertezas da medição de tensões residuais (Set_02Par usando K1 e K2)										
Processo de medição: Verificação do ponto de 0,5Sy					Unidade: MPa					
		Efeitos sistemáticos			Efeitos aleatórios					
Símbolo	Descrição	Estimativa	Correção	Unidade	Valor bruto	Unidade	Distribuição	Coefficiente de sensibilidade	u (MPa)	v
Re	Repetitividade	-	-	-	18,52	MPa	normal	1	18,52	2
Po	Calibração da ponte	-	-0,12	MPa	4,04	µm/m	normal	0,2 MPa/(µm/m)	0,40	∞
Vd	Variação da deformação	-	0,46	MPa	0,79	µm/m	normal	0,2 MPa/(µm/m)	0,08	2
Fe	Fator do extensômetro	1%	-	-	7,38	µm/m	retangular	0,2 MPa/(µm/m)	0,85	∞
Ep	Posicionamento do extensômetro	1°	-	-	0,13	µm/m	retangular	0,2 MPa/(µm/m)	0,02	∞
Vp	Variações nas propriedades mecânicas	0,20%	-	-	1,48	µm/m	retangular	0,2 MPa/(µm/m)	0,17	∞
Tra	Tensões residuais pré-existent	-	-	-	72,77	µm/m	retangular	0,2 MPa/(µm/m)	8,40	2
Fcp	Existência de flexão no corpo de prova	15 µm/m	-	-	15,00	µm/m	retangular	0,2 MPa/(µm/m)	1,73	∞
An	Efeito arredondamento numérico	1%	-	-	1,48	MPa	retangular	1	0,85	∞
Res	Resolução do cabeçote de medição	0,1 µm/m	-	-	0,05	µm/m	retangular	0,2 MPa/(µm/m)	0,01	∞
Dx	Descentralização da imagem em "x"	3 pixel	-	-	0,05	MPa	retangular	1	0,03	∞
Dy	Descentralização da imagem em "y"	3 pixel	-	-	0,13	MPa	retangular	1	0,08	∞
Tx	Deslocamento de corpo rígido (translação em "x")	1 µm	-	-	0,07	MPa	retangular	1	0,04	∞
Ty	Deslocamento de corpo rígido (translação em "y")	1 µm	-	-	0,09	MPa	retangular	1	0,05	∞
E	Valor do módulo de elasticidade	6 GPa	-	-	4,06	MPa	retangular	1	2,34	∞
Ev	Valor do coeficiente de Poisson	0,02	-	-	8,02	MPa	retangular	1	4,63	∞
Fi	Fator de escala da imagem	0,00005 mm/pixel	-	-	0,75	MPa	normal	1	0,38	14
Rc	Razão de aspecto da câmara	0,10%	-	-	0,70	MPa	retangular	1	0,40	∞
Ro	Ruído óptico da imagem	-	-	-	0,32	MPa	retangular	1	0,18	∞
Pi	Posição do raio interno de medição	0,5 mm	-	-	0,39	MPa	retangular	1	0,23	∞
Pe	Posição do raio externo de medição	0,5 mm	-	-	0,65	MPa	retangular	1	0,38	∞
Ea	Incerteza de ajuste de curva dos parâmetros K1 e K2	-	-	-	6,36	MPa	normal	1	3,18	2
V4	Variabilidade de K4	47,12 N	-	-	6,45	MPa	normal	1	3,23	2
										3,54
	Correção combinada		0,34					uc	21,59	
U	Incerteza expandida							U	68,71	

FONTE: Próprio autor.

As figuras 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4 mostram as contribuições de cada fonte de incertezas na incerteza combinada, referentes a cada método de cálculo de tensões residuais:

Figura 8.1: Parcelas de cada fonte de incerteza na incerteza combinada, usando o método “Set_02Par”, utilizando K_1 e K_2 , no ponto de verificação de 147,5 MPa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8.2: Parcelas de cada fonte de incerteza na incerteza combinada, usando o método “Set_02Par”, utilizando K_2 , no ponto de verificação de 147,5 MPa.



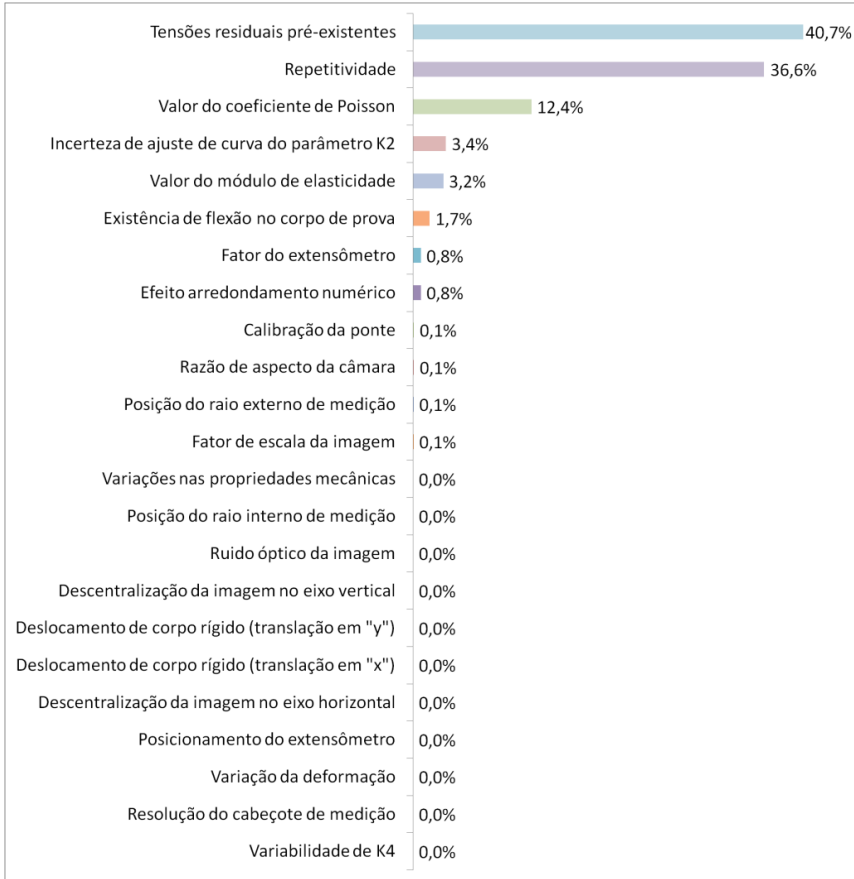
Fonte: Próprio autor.

Figura 8.3: Parcelas de cada fonte de incerteza na incerteza combinada, usando o método “Set_02Par”, utilizando K_1 e K_2 , no ponto de verificação de 206,5 MPa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8.4: Parcelas de cada fonte de incerteza na incerteza combinada, usando o método “Set_02Par”, utilizando somente K_2 , no ponto de verificação de 206,5 MPa.



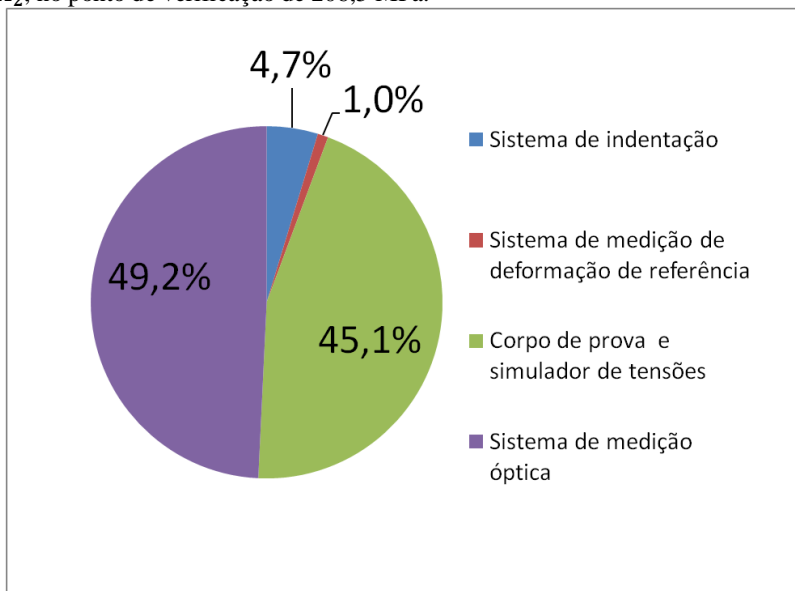
Fonte: Próprio autor.

Observando as figuras 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4 nota-se que para metade dos casos a maior influência sobre a incerteza da correção de verificação é referente à repetitividade na medição das tensões residuais, e na outra metade a maior influência é devida à tensão residual remanescente do processo de alívio de tensões. Após estas, as incerteza do valor do coeficiente de Poisson e de ajuste de curva são as maiores contribuições para o erro aleatório na determinação das tensões residuais. As incertezas relacionadas à resolução do cabeçote de

medição, no posicionamento dos extensômetros, à variação da deformação, e à maioria dos parâmetros usados no *software* de análise são valores considerados desprezíveis ($< 0,5\%$).

A avaliação quanto à confiabilidade dos sistemas de referência e simulação de tensões é necessária para qualificar a verificação do sistema de medição. Para isto, as parcelas da incerteza combinada oriundas de cada módulo do aparato experimental são separadas e representadas em um gráfico. A figura 8.5 mostra os resultados para o ponto de verificação com 70% do S_y :

Figura 8.5: Influência aproximada de cada módulo do aparato experimental no valor da incerteza combinada, usando o método “Set_02Par”, utilizando K_1 e K_2 , no ponto de verificação de 206,5 MPa.



Fonte: Próprio autor.

A figura 8.5 indica que o sistema de referência de medição do valor da tensão simulada tem incerteza de 1% do valor total. Este valor atende com folga o mínimo do recomendado (ALBERTAZZI JR, 2008) para uma verificação com qualidade, que seria até 10% do valor total, para o padrão de tensões residuais. Entretanto, fatores relacionados ao corpo de prova e ao simulador de tensões representam uma incerteza de

45,1% do valor total, o que limita enormemente a referência da tensão avaliada pelo sistema de medição. Neste caso, a única parcela de incertezas deste módulo passível de ser atenuada é a relativa aos erros geométricos do corpo de prova.

Os valores calculados referentes à repetitividade do cálculo das tensões residuais uniaxiais estão diretamente atrelados à variabilidade dos parâmetros relacionados à soma e à diferença das tensões principais. Suterio (2005) em sua análise metrológica, estima que cerca de 29% da incerteza combinada seja devida à variação do parâmetro K_1 e 8% da incerteza combinada seja em função da repetitividade de K_2 .

Fica claro que a determinação prévia das propriedades do material avaliado com melhor incerteza, ou até mesmo simultaneamente com a medição das tensões residuais, trará uma considerável queda do valor da incerteza deste fator. Já existe atualmente (2012) no LabMetro projeto que visa desenvolver e validar este tipo de procedimento de medição usando a indentação, o que contribuirá muito com a melhora da confiabilidade do sistema de medição de tensões residuais.

É possível notar também nas figuras 8.1 a 8.4 que a parcela de incerteza devida à variabilidade do parâmetro K_4 é desprezível para o caso no qual a tensão residual é calculada baseando-se somente no parâmetro responsável pela diferença das tensões residuais principais (K_2). Isto já era esperado, já que este termo é dependente de $\cos(2\theta)$ e não é afetado pelo campo axisimétrico gerado pela indentação.

8.3 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO

A incerteza expandida do ângulo β no modelo “Set_02Par” para valores acima de 20% da tensão de escoamento do material (região de estabilização de β) é calculada e comparada com valores de trabalhos anteriores. A tabela 8.3 apresenta estes resultados:

Tabela 8.3: Comparação dos valores de repetitividade média para a direção das tensões residuais (β).

Trabalho	Técnica	Material avaliado	Repetitividade média de β (°)
Atual	indentação	aço 1020	3,4
Suterio (2005)	indentação	aço 1020	6,7
Rodacoski (1997)	furo	aço 1045	3,1

FONTE: Próprio autor.

O estudo da tabela 8.3 mostra que o atual trabalho gera uma queda de 49,3% na repetitividade do ângulo β usando o método da indentação, sendo um valor comparável ao obtido pela técnica do furo associada à interferometria radial.

A tabela 8.4 mostra as equações de verificação aplicáveis nos pontos de medição, para o resultado de uma única medição ou três medições, e usando o método “Set_02Par” em suas duas versões: utilizando os parâmetros K_1 e K_2 , e empregando somente K_2 :

Tabela 8.4: Equações de verificação para os pontos de $0,5S_Y$ e $0,75S_Y$ utilizando o modelo “Set_02Par”, para o aço SAE 1020.

Nº de medições	σ_{ref}	σ_1 usando K_1 e K_2	σ_1 usando K_2
1	147,5MPa	$RM = I + 0,3 \pm 62 \text{ MPa}$	$RM = I - 2,0 \pm 44 \text{ MPa}$
	221,3 MPa	$RM = I - 8,1 \pm 30 \text{ MPa}$	$RM = I - 6,7 \pm 31 \text{ MPa}$
3	147,5MPa	$RM = \bar{I} + 0,3 \pm 62 \text{ MPa}$	$RM = \bar{I} - 2,0 \pm 46 \text{ MPa}$
	221,3 MPa	$RM = \bar{I} - 8,1 \pm 29 \text{ MPa}$	$RM = \bar{I} - 6,7 \pm 30 \text{ MPa}$

FONTE: Próprio autor.

, onde I é o valor da indicação do resultado e \bar{I} é o valor da média de três indicações deste.

O exame da tabela 8.4, usando-se uma medição ($n=1$), mostra que para o ponto de 147,5 MPa há uma redução na incerteza da correção em 29,0% usando-se somente o parâmetro K_2 . Já para o ponto de 221,3 MPa, há o aumento de 3,2% usando esta mesma versão. Este último fato se deve à queda do número de graus de liberdade efetivos no balanço de incertezas, o que aumenta o valor da incerteza expandida.

Na mesma tabela, utilizando-se três medições ($n=3$), no ponto de 147,5 MPa há uma queda na incerteza de 30,6% usando somente o parâmetro K_2 . No ponto de 221,3 MPa há um aumento de 3,4% na incerteza usando esta versão.

Como já apresentado na seção 7.4.1.1, na tentativa de representar melhor o comportamento do sistema de medição de tensões residuais, dada a sua alta variabilidade ponto a ponto nos valores de repetitividade, é adotada uma segunda abordagem na expressão da repetitividade do sistema. Assim, são calculadas a repetitividade média e a “repetitividade dos resíduos” na faixa de 0 a 80% do limite de escoamento do aço SAE 1020 para cada modelo de cálculo. Como os resultados da repetitividade média são mais conservativos (maiores), estes valores são utilizados no cálculo de outras equações de verificação, como é feito na tabela 8.4, procurando caracterizar a incerteza típica que poderia ser obtida caso as causas que produzem grande variabilidade em alguns pontos possam ser atenuadas. A tabela 8.5 mostra as expressões obtidas para os casos de uma e para três medições realizadas:

Tabela 8.5: Equações de calibração para os pontos de $0,5S_Y$ e $0,75S_Y$ utilizando o modelo “Set_02Par” e repetitividade com valores de repetitividade média.

Nº de medições	σ_{ref}	σ_1 usando K_1 e K_2	σ_1 usando K_2
1	147,5MPa	$RM = 1 + 0,3 \pm 39 \text{ MPa}$	$RM = 1 - 2,0 \pm 32 \text{ MPa}$
	221,3 MPa	$RM = 1 - 8,1 \pm 36 \text{ MPa}$	$RM = 1 - 6,7 \pm 32 \text{ MPa}$
3	147,5MPa	$RM = \bar{I} + 0,3 \pm 36 \text{ MPa}$	$RM = \bar{I} - 2,0 \pm 33 \text{ MPa}$
	221,3 MPa	$RM = \bar{I} - 8,1 \pm 35 \text{ MPa}$	$RM = \bar{I} - 6,7 \pm 32 \text{ MPa}$

FONTE: Próprio autor.

Ao comparar tabela 8.4 com a tabela 8.5, fica claro o melhor comportamento entre pontos diferentes usando os valores de repetitividade média no balanço de incertezas na verificação. Além disso, para esta última tabela todos os resultados de incerteza usando somente K_2 são menores dos do modelo usando os dois parâmetros.

Enfim, a análise das tabelas 8.4 e 8.5 gera duas importantes conclusões a respeito da incerteza do sistema de medição, dadas as condições das verificações efetuadas neste trabalho:

- Uma única medição de tensões residuais uniaxiais tem a incerteza de no máximo ± 44 MPa usando o melhor modelo de cálculo, nos pontos avaliados;

- O uso da repetitividade média da faixa avaliada no balanço de incertezas durante a verificação dos pontos de medição representa uma previsão mais estável do comportamento típico esperado para o sistema de medição uma vez que as causas que eventualmente levam à grandes variações locais sejam eliminadas;

A partir das equações das tabelas 8.4 e 8.5 são calculados os resultados de medição dos pontos, medidos independentemente, de 147,5 MPa e 221,3 MPa. O valor da tensão de referência é também estimado, e o cálculo de sua incerteza é baseado nas fontes de incerteza advindas do sistema de medição de referência e do corpo de prova (descritas na seção 8.1). A tabela 8.6 mostra os valores obtidos:

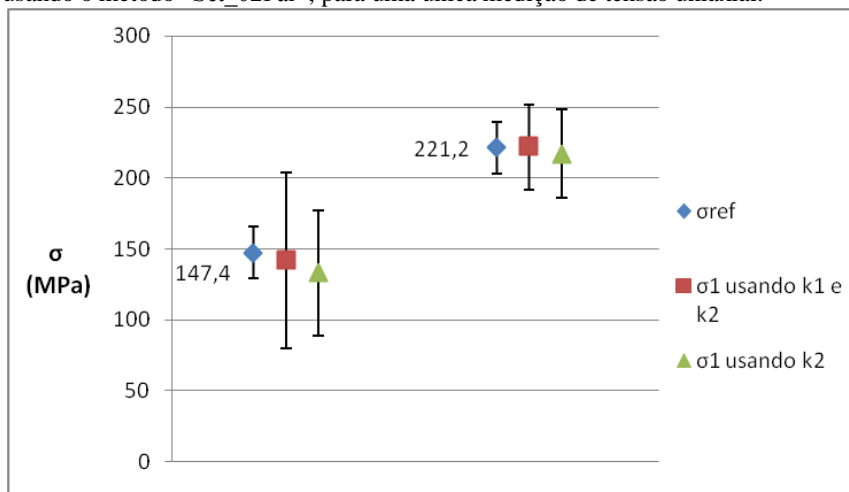
Tabela 8.6: Resultados de medição de tensões residuais uniaxiais para os pontos de $0,5S_Y$ e $0,75S_Y$ utilizando o modelo “Set_02Par”.

Nº de medições	σ_{ref} (MPa)	σ_1 usando K_1 e K_2 (MPa)	σ_1 usando K_2 (MPa)
1	$147,4 \pm 18$ (129,4 – 165,4)	142 ± 62 (70 – 214)	133 ± 44 (90 – 176)
	$221,2 \pm 18$ (203,2 – 239,2)	222 ± 30 (188 – 256)	217 ± 31 (185 – 249)
1 (usando a repetitividade média)	$147,4 \pm 18$ (129,4 – 165,4)	142 ± 39 (96 – 188)	133 ± 32 (100 – 166)
	$221,2 \pm 18$ (203,2 – 239,2)	222 ± 36 (183 – 261)	217 ± 32 (183 – 251)
3	$147,4 \pm 18$ (129,4 – 165,4)	142 ± 62 (66 – 218)	133 ± 46 (91 – 175)
	$221,2 \pm 18$ (203,2 – 239,2)	222 ± 29 (191 – 253)	217 ± 30 (185 – 249)

FONTE: Próprio autor.

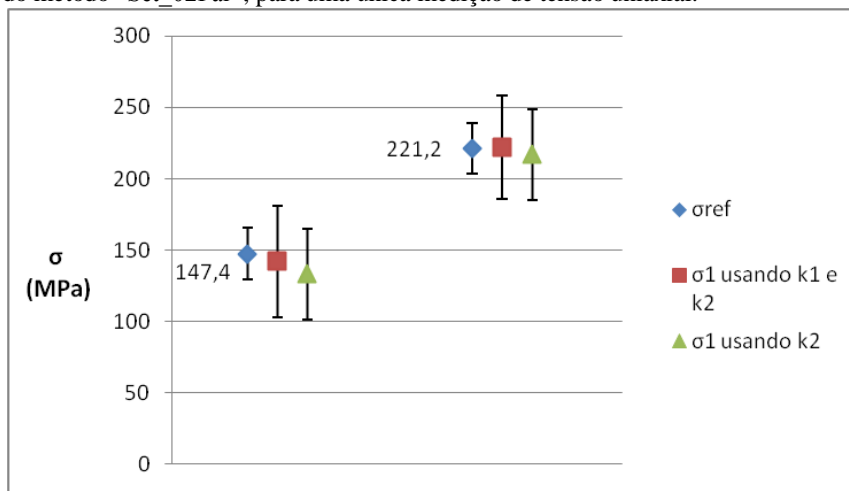
As figuras 8.6, 8.7 e 8.8 mostram as faixas dos resultados de medição de σ_1 em comparação com as respectivas faixas da tensão de referência σ_{ref} :

Figura 8.6: Comparação dos resultados de medição com a tensão de referência usando o método “Set_02Par”, para uma única medição de tensão uniaxial.



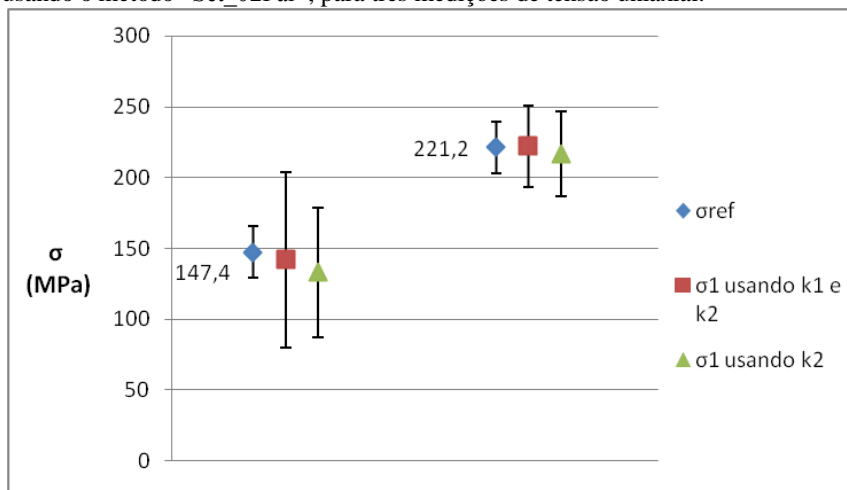
Fonte: Próprio autor.

Figura 8.7: Comparação dos resultados de medição usando valores de repetitividade média da faixa de verificação, com a tensão de referência através do método “Set_02Par”, para uma única medição de tensão uniaxial.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8.8: Comparação dos resultados de medição com a tensão de referência usando o método “Set_02Par”, para três medições de tensão uniaxial.



Fonte: Próprio autor.

A observação da tabela 8.6 em conjunto com as figuras 8.6, 8.7 e 8.8 mostra que em todos os casos as faixas dos valores de referência de tensão se encontram dentro das faixas dos resultados de medição. Para o caso das medições de σ_1 usando somente o parâmetro correlacionado à subtração das tensões principais, embora também conservador com relação à referência, possui menor variabilidade em relação ao caso do uso de K_1 e K_2 .

Na mesma tabela, exceto o ponto de 147,5 MPa com o uso da repetitividade pontual, em todos os resultados usando somente o parâmetro K_2 as parcelas de incerteza de medição estão próximas da faixa típica de outros processos de medição de tensões residuais normalizados, como os métodos da difração de nêutrons (± 30 MPa) e o da deflexão (± 30 MPa).

CAPÍTULO 9

9 CONCLUSÕES

Este trabalho reavalia um método para medir tensões residuais uniaxiais combinando o método da indentação com a holografia eletrônica (ESPI- “*Electronic Speckle Pattern Interferometry*”), usando um interferômetro radial. É testado um aparato experimental automatizado e instrumentado, em conjunto com modelos matemáticos desenvolvidos e avaliados em um trabalho precedente (SUTERIO, 2005). Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos aspectos positivos, limitações dos resultados alcançados e propostas para trabalhos futuros.

9.1 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

Do ponto de vista de engenharia, a medição por holografia é atrativa por uma grande razão: elevada sensibilidade. Neste método é adquirida uma elevada quantidade de dados de micro deslocamentos da superfície do material em pouco tempo.

O método da indentação associado à holografia eletrônica é um processo semi-destrutivo de medições de tensões residuais, sendo o menos invasivo desta classe. Não gera cavacos, é de fácil portabilidade, e o tempo de medição é aproximadamente cinco vezes menor que o método do furo por holografia e aproximadamente dez vezes menor que a técnica do furo com extensometria. O tempo de medição típico é de dez minutos com a instrumentação existente atualmente.

Um das maiores vantagens da indentação associada à holografia eletrônica é a sua faixa de medição. No presente trabalho foi possível medir tensões uniaxiais de 0 a 80% do limite de escoamento do aço SAE 1020, e calcular a direção destas tensões para a faixa de 20% a 80% deste limite.

O módulo de indentação instrumentada empregado neste trabalho melhora substancialmente a repetitividade na aplicação da carga em relação à versão anteriormente utilizada por Suterio (2005).

Além disso, ele abre a possibilidade de ser utilizado em conjunto com um modelo matemático adequado, para determinar simultaneamente, além das tensões residuais, as propriedades mecânicas do material avaliado. De fato, a literatura técnica especializada reporta vários trabalhos que usam indentação instrumentada para determinar propriedades elásticas de metais, como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e do coeficiente de encruamento. A combinação deste conhecimento com as informações que podem ser obtidas da holografia criam uma nova área de pesquisa promissora.

9.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE CÁLCULO

Os dois principais modelos adotados neste estudo, “Set_02Par” e “Set_02Par_Indent” são derivados do método do furo cego, modificados com a introdução de coeficientes adicionais determinados empiricamente. Estes são correlacionados à soma das tensões principais através da função $H(K_1)$ e à diferença das tensões principais pela função $\Gamma(K_2)$, sendo estas simuladas em experimentos controlados.

O cálculo do parâmetro K_1 envolve elevada sensibilidade, o que o torna pouco repetitivo em função de vários fatores como as variações na aplicação da carga de indentação, a não homogeneidade do material, as diferenças de distribuições de tensão pontuais e a ruídos na imagem do mapa de fase.

Já o parâmetro K_2 , relacionado à subtração das tensões principais, tem um comportamento bem mais estável, linear, repetitivo e com ótima correlação. Além disto, sofre pouca influência da carga de indentação aplicada e do modelo de cálculo utilizado. É o parâmetro preferido para o cálculo da diferença entre as tensões principais e, no caso particular, da tensão residual uniaxial.

Na análise de respostas dos modelos de cálculo selecionados é realizada uma regressão polinomial de segunda ordem para os seus parâmetros, obtendo-se uma correlação muito boa para os parâmetros usados no modelo “Set_02Par_Indent”.

A avaliação e comparação dos modelos de cálculo mostram que os melhores resultados de repetitividade média são alcançados para o modelo “Set_02Par” usando somente o parâmetro K_2 . Entretanto, o nível descritivo da análise estatística mostra que este modelo gera valores similares ao método “Set_02Par_Indent”, bem como que não

existem diferenças consideráveis entre resultados utilizando dois parâmetros de cálculo e usando apenas um parâmetro.

9.3 ASPECTOS GERAIS DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO

Foi realizada no escopo deste trabalho uma verificação independente do sistema de medição para os pontos de 50% e 75% do limite de escoamento do aço SAE 1020, utilizando o modelo “Set_02Par”. A análise metrológica, que inclui o sistema de medição de deformações de referência, de simulação de tensões uniaxiais e de medição óptica, mostra que as maiores fontes de incertezas da correção estão relacionadas à repetitividade do sistema de medição, à existência de tensões residuais remanescentes no corpo de prova e à incerteza das propriedades do material. O parâmetro relacionado à soma das tensões principais é o maior contribuinte para o agravamento da repetitividade dos resultados de tensão residual uniaxial medida.

Em casos onde a curva de erros da faixa de calibração apresenta variações bruscas na repetitividade pontual, o uso da repetitividade média no balanço das incertezas prevê melhor o comportamento característico esperado para os erros aleatórios do sistema de medição assumindo que as principais causas dos pontos atípicos possam ser controladas.

Exceto para um dos dois pontos analisados, a medição da tensão residual uniaxial apresentou níveis de incerteza próximos aos valores típicos de outros sistemas de medição de tensões residuais normalizados. Com relação à medição da direção da tensão principal, a repetitividade alcançada é comparável ao valor típico gerado pelo método do furo associado à holografia eletrônica.

Baseando-se nos resultados de menor incerteza de medição gerados pelo uso da repetitividade média para uma baixa taxa de amostragem estatística ($n=3$), resulta evidente que com um número razoavelmente maior de medições na verificação da faixa de estudo deve haver uma queda considerável tanto na variação da repetitividade entre pontos de medição, quanto na repetitividade pontual. Se, além disto, forem mais bem conhecidas as propriedades dos materiais avaliados, e aprimorado o sistema de simulação de tensões uniaxiais, espera-se alcançar incertezas de medição da ordem de ± 20 MPa.

9.4 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS

Os resultados obtidos neste trabalho são válidos somente para a medição de tensões uniaxiais no aço SAE 1020.

A análise metrológica aponta que um forte fator limitante do aparato experimental utilizado neste trabalho é o sistema de simulação de tensões uniaxiais. Especificamente no corpo de prova, as tensões residuais remanescentes do alívio de tensões e os erros geométricos (principalmente empenamentos) da barra são os principais fatores de incerteza deste sistema. É notável também a influência negativa, sobre os resultados de medição, da camada superficial advinda do alívio de tensões quando a indentação é realizada próxima às bordas do corpo de prova. A espessura desta camada na região central do corpo de prova é muito estreita, o que parece afetar muito pouco nos deslocamentos gerados pela indentação nesta região.

No sistema de medição de tensões residuais por indentação associada ao interferômetro radial as maiores fontes de incerteza estão associadas à repetitividade e à falta de informações sobre as propriedades mecânicas do material avaliado. A baixa carga de indentação (baixa sensibilidade) e o baixíssimo número de medições repetidas por ponto provavelmente são os responsáveis pela alta variabilidade do cálculo do parâmetro relacionado à soma das tensões principais K_1 ao longo da faixa de medição.

9.5 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo traz uma contribuição significativa na medição de tensões residuais utilizando a indentação associada à holografia eletrônica. Entretanto, há muito ainda a ser realizado para o aprimoramento desta técnica. Baseando-se nas limitações encontradas, seguem-se algumas propostas para as próximas pesquisas nesta área.

O desenvolvimento do método da indentação para a avaliação de medição de gradientes de tensões residuais ao longo da profundidade é um dos objetivos finais desta linha de pesquisa. No entanto, o próximo passo antes deste sistema ser levado a campo é, sem dúvida, a validação deste utilizando corpos de prova carregados com tensões biaxiais.

Outra proposta interessante também, citada em um trabalho anterior (SUTERIO, 2005), e que não foi realizada, visa ensaios uniaxiais de compressão. Para materiais isotrópicos espera-se que os modelos matemáticos sejam válidos. No caso de outros tipos de materiais é necessária uma verificação.

Quando for usado o simulador de tensões uniaxiais por tração (utilizado neste trabalho), se faz necessário o uso de barras trefiladas, o que garante uma melhor tolerância dimensional destas. Além disto, com relação a este módulo, é importante também:

- Conhecer melhor as propriedades mecânicas do material avaliado;
- Obter com melhor incerteza a influência das tensões residuais remanescentes do alívio de tensões no corpo de prova;
- Fazer um estudo mais aprofundado a respeito das influências da camada de tinta e da casca resultante do alívio de tensões, presentes na superfície do material avaliado, na medição de tensões residuais;
- Recomenda-se a mudança de posição dos oito extensômetros periféricos para locais próximos ao centro da barra, usando somente esta parte para medições, dada a melhor constância de tensões nesta região.

O uso de maiores cargas de indentação e o emprego de médias de pelo menos dez resultados de medição por ponto na verificação do sistema, provavelmente causará uma redução considerável na incerteza de medição.

Finalmente é essencial uma verificação no sistema de indentação buscando a identificação de possíveis causas da baixa repetitividade encontrada em alguns pontos de medição.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI JR, A. G.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1 ed. Barueri: Manole, SP. 2008

ALBERTAZZI JR, A. G. Disciplina: **Metrologia óptica**. Slides de aula, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ALBERTAZZI JR. et al. Evaluation of a Residual Stresses Measurement Device Combining a Radial In-Plane ESPI and the Blind Hole Drilling Method. **SPIE - The International Society for Optical Engineering, Europe International Symposium Photonics**, Strasbourg, France, 26-30 April, 2004.

ALBERTAZZI JR. et al. MTRES - Um sistema para medições de tensões residuais combinando o método do furo com a holografia eletrônica. **SAET 2000 - VI Simpósio de Análise Experimental de Tensões**, Florianópolis - SC, Dez. 8, 2000.

ALBERTAZZI JR. et al. Residual stresses measurement using a radial in-plane interferometer: Recent advances and perspectives. **SAET 2000 - VI Simpósio de Análise Experimental de Tensões**. Florianópolis - SC, Dez. 8, 2000.

ALBERTAZZI JR., A. G. Aplicações da holografia eletrônica em ambiente industrial - realidade & perspectivas. CERTI / UFSC - **Seminário Internacional de Metrologia para Controle da Qualidade**. Florianópolis, SC, Brasil, módulo 1, artigo 1, Ago. 21-22, 1997.

ALBERTAZZI JR., A. G. Generalized least squares approach to compute displacements, strain and rotations from combined single and/or double illumination holographic interferometry. **SPIE - The International Society for Optical Engineering**, v. 2004, Interferometry VI: Applications, p. 80-89, 1993.

ALBERTAZZI JR., A. G.; KANDA, C.; BOETTGER, J. Adequação de um interferômetro radial para medição de tensões residuais por meio da holografia eletrônica. **ABCM / CEIE / CAET - III Simpósio de**

Análise Experimental de Tensões, Rio de Janeiro, RJ, p.19-26, Dez., 1995.

ARKIN, W. T. **New developments in lasers and electro-optics research**. New York: Nova Publishers, 2007. 275 p.

ASTM standard E837-08e1. **Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

BHADESHIA, H. K. D. H. Material factors. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. ASM International, Ohio, 2002.

BOETTGER, J. **Desenvolvimento de um sistema portátil para a medição de tensões residuais em campo utilizando holografia eletrônica e o método do furo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).- Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1998.

BORGES, M. R. **Otimização de um medidor portátil de tensões residuais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).- Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.2000.

BOUSSINESQ, J. Boussinesq, J. **Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques**, Paris: Gauthier-Villars, , 1885.

BRUNO, L.; SCIUMÈ, G. Deformation field induced by spherical indentation: numerical analysis and experimental measurement by speckle interferometry. **Optics and Lasers in Engineering**. 42 289–301. 2004.

BULHAK, J., **Interférométrie différentielle sur réseau: nouvelle méthode optique de mesure de déformations avec grande résolution spatiale**. 2001. Tese de Doutorado, Université Jean Monnet. Saint Étienne.

CALLEGARI, VÍVIAN A. et al. Influência da topografia superficial nas propriedades mecânicas medidas através de ensaios de macroindentação instrumentada. **15º POSMEC- Simpósio do Programa de Pós-**

Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2005.

CALLISTER JR., W. D. **Materials science and engineering: an introduction.** 4 ed. John Wiley & Sons, USA. 1997.

CARLSSON, S.; LARSSON, P. L. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part II: experimental investigation. **Acta Materialia**, v. 49, n. 12, p. 2193-2203. 2001.

CARLSSON, S.; LARSSON, P. L. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part I: theoretical and numerical analysis Original. **Acta Materialia**, v. 49, n. 12, , p. 2179-2191. 2001.

CORDOVIL, F. C. S. - **Desenvolvimento de um dispositivo para simulação experimental de tensões residuais por carregamento mecânico.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

CREATH, K. **Temporal phase measurement methods.** Interferogram Analysis, Cap. 4, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F. - **Experimental stress analysis** - McGraw-Hill, USA, 3 ed., 1991.

DÍAZ, F.V.; KAUFMANN, G.H.; MÖLLER, O. Residual stress determination using blind-hole drilling and digital speckle pattern interferometry with automated data processing. **Exp Mech** 41 (4):319–323. 2001.

DOWLING, N. E. **Mechanical behavior of materials.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall. NJ, USA. 1993.

ELMUSTAFA, A. A.; STONE, D. S. Nanoindentation and the indentation size effect: kinetics of deformation and strain gradient plasticity. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, MPS 932, p.1-25, 2002.

FENG, G. et al. An analytical expression for the stress field around an elastoplastic indentation/contact. **Acta Materialia**. n. 55, p. 2929–2938. 2007.

FISCHER-CRIPPS, A.C. **Nanoindentation**. New York: Springer, 2004.

FOURNIER, J. M.: JACQUOT, P. **Interferometry in speckle light: theory and applications**. Lausanne: Springer, Suíça. 2000. 657 p.

FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. 3 ed. Springer. 2003. 589 p.

FURGIUELE, F.M., PAGNOTTA, L; POGGIALINI A. Measuring residual stresses by hole-drilling and coherent optics techniques: a numerical calibration. **J Eng Mater Technol**. 113(1):41–50. 1991.

GASVIK, K. J. Optical metrology. 2 ed. John Wiley & Sons Ltd., England, 1995.

GAUTSCHI, G. **Piezoelectric sensorics: force, strain, pressure, acceleration and acoustic ages**. Springer. 2012. 278 p.

GIANNAKOPOULOS, A. E.; SURESH, S. Indentation of solids with gradients in elastic properties. Part I: point force. **Journal of Solids and Structures**, v.34, n.19, p.2357- 2392, 1997.

GONÇALVES, C. **Elemento óptico difrativo de luz branca gerado por computador**. 2007. 157f. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica, área de Telecomunicações) – Departamento de Engenharia Elétrica da EESC), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

GOODMAN, J. W. **Speckle phenomena in optics: theory and applications**. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers. CO, USA. 2007. 387 p.

GOODMAN, J.W. **Introduction to fourier optics**. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, CO, USA. 2005. 491 p.

HARIHARAN, P. **Basics of interferometry**, 2 ed. Burlington: Academic Press, MA, USA. 2007. 226 p.

HARIHARAN, P.; OERB, B. F.; EIJU, T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm. **Appl. Opt.**, n. 26, p. 2504. 1987.

HAYASKI, M. et al., Residual stress distribution measurement in plastically bent carbon steel by neutron diffraction. **The Fifth International Conference on Residual Stresses**, Vol. 2, Inst. of Tech., Linkopinos University, Suécia, 762–769, 1997.

HECHT, E. **Optics**, 4 ed, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, USA. 2002. 698 p.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5 ed. São Paulo: Pearson / Prentice Hall, SP. 2004. 688 p.

HUNG, M. Y. Y.; LONG, K. W.; WANG, J. Q. Measurement of residual stress by phase shift shearography. **Optics & Lasers in Engineering**, v. 27, p. 61-73, 1997.

INMETRO. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. Rio de Janeiro: Inmetro. 2003.

KAPP, W. A. **Desenvolvimento de uma roseta óptica difrativa para medição de nanodeslocamentos, deformações, tensões e tensões residuais**. 2010. 134f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KAPP, W. A. **Otimização do desempenho metrológico do sistema de medição estação holográfica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).- Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1997.

KAUFMANN, G. H. **Advances in speckle metrology and related techniques**. Weinheim, Germany. WILEY-VCH. 2011. 309 p.

KOBAYASHI, A. S. - **Handbook on Experimental Mechanics**. SEM - Society for Experimental Mechanics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1993.

KOKUBO, S. Changes in hardness of a plate caused by bending, **Science Reports of the Tohoku Imperial University**, Japão, Series 1, 21, 256–267, 1932.

LEE, Y; KWON, D. Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters. **Acta Materialia**, v. 52, n. 6, p. 1555–1563, 2004.

LI, L.; GU, J. An analytical solution for the unloading in spherical indentation of elastic–plastic solids. **International Journal of Engineering Science**. n. 47. p. 452–462. 2009.

LIN, S. T.; HSIEH, C. T.; HU, C. P. Two holographic blind-hole methods for measuring residual stresses. **Experimental Mechanics**, v. 34, n. 2, p. 141–147, Jun., 1994.

LOVE, A. E. H. A Treatise on the mathematical theory of elasticity. 4 ed. New York: Dover Publications, USA, 1927.

LU, J. - **Handbook on measurement of residual stresses - SEM** - Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Lilburn, GA, USA, 1996.

MACKENZIE, D. S.; TOTTEN, E. G. **Analytical characterization of aluminum, steel, and superalloys**. Boca Raton, FL: CRC Press - Taylor & Francis Group. 2006

MAKINO, A.; NELSON, D. Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole drilling - Part I: theory. **Experimental Mechanics**, p. 66–78, Mar., 1994.

MALVERN, L. E. **Introduction to the mechanics of a continuous medium**. Englewood Cliffs: Prentice- Hall, NJ, USA, 1969.

MCDONACH et al. Improve moiré interferometry and applications in fracture mechanics, residual stresses and damage composites. **Experimental Techniques**, v. 7, n. 6, p. 20–24. 1983.

MCGINNIS, M. J.; PESSIKI, S.; TURKER, H. Application of threedimensional digital image correlation to the core-drilling method. **Exp Mech** 45(4):359–367. 2005.

MIN, Y. et al. Determination of residual stress by use of phase shifting moiré interferometry and hole-drilling method, **Optics and Lasers in Engineering**, n.44, p. 68-79. 2006.

NELSON, D. V.; MAKINO, A.; SCHMIDT, T. Residual stress determination using hole drilling and 3D image correlation. **Exp Mech.** n.46. p.31–38. 2006.

NUNES, R. M., **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada com aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS. Porto Alegre.

ODO, G. Y. **Fundamentos da nanoindentação e aplicações em vidros com superfícies modificadas por migrações iônicas**. Tese de Doutorado, UFPR - Universidade Federal do Paraná, 2001.

PANE, I.; BLANK, E. Role of plasticity on indentation behavior: Relations between surface and subsurface responses. **International Journal of Solids and Structures**. n.43, p. 2014–2036. 2006.

PECHERSKY, M. J.; ESTOCHEN, E. G.; VIKRAN, C. S. Enhanced measurement of residual stress by speckle correlation interferometry and local heat treating for low stress levels. **ASME Pressure Vessels and Piping Conference**. Atlanta, Georgia, USA. p. 22-26. Jul. 2001.

PECHERSKY, M. J.; ESTOCHEN, E. G.; VIKRAN, C. S. Measurement of residual stress with through thickness gradients using laser heating and speckle interferometry. **Advance Program, 1999 SEM Annual Conference & Exposition on Theoretical, Experimental and Computational Mechanics**. Cincinnati, Ohio, USA, p. 746-749, 7-9 Jun., 1999.

PEIXOTO FILHO, F. T. **Avaliação de sistemas de medição de tensões e tensões residuais em dutos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).- Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

PITELLA, R. M. **Determinação de tensões residuais em aço C45 PBK em condições limites de usinagem**. 2003. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

POMEY, J.; GORATEL, F.; ABEL, L., Determination des cartraintes residuelles dans les pieces einentees. **Publication Scientifiques et Techniques du Ministere de l'air**, 263, 1950.

RAMOS NETO, FRANCISCO F. et al., Instrumentação e controle de um macroindentador portátil para avaliação de propriedades mecânicas de dutos. **13º POSMEC- Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2003.

RIBEIRO, J. E. P.C. **Caracterização experimental e numérica de campos de tensões residuais provocadas por processos de fabrico**. 2006. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

RODACOSKI, M. R. **Medição de tensões residuais localizadas através da holografia eletrônica**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROOT, J.H.; HOUSBAUS, R.R.; HOLDEN, T.M., Neutron diffraction measurements of residual stresses near a pin hole in a solid-fuel booster rocket casing. **Practical Applications of Residual Stress Technology**, Ed. Ruud, C.O., ASM International, p. 83–93, 1991.

SCHAJER, G. S. Application of finite element calculations to residual stress measurements. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v.103, p.157-163, Abr. 1981.

SCHAJER, G. S. Measurement of non-uniform residual stress using the hole-drilling method. Part I: stress calculation procedures. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v.110, p.338-343, Out. 1988.

SCHAJER, G. S. Measurement of non-uniform residual stress using the hole-drilling method. Part II: application of the integral method.

Journal of Engineering Materials and Technology, v.110, p.344-349, Out. 1988.

SCHAJER, G. S. Use of displacement data to calculate strain gauge response in non- uniform strain fields. **Strain**, p. 9-13, Fev. 1993.

SCHAJER, G. S.; Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities. **Experimental Mechanics**. n.50. p. 245–253. 2010.

SHARPE JR., W. N.; SHARPE, W. N. **Handbook of experimental solid mechanics**. Springer Verlag, Nova York, 2008. 1097 p.

SINES, G.; CARLSON, R. Hardness measurements for the determination of residual stresses. **ASTM Bulletin**, No. 180, 35–37, Fev. 1952.

SOARES A. C. C. **Avaliação dos efeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pela técnica do furo cego**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

SOARES, M. C. B. V.; **Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas**. 1998. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear). Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo.

SOLOMAN, S. **Sensors handbook**, McGraw-Hill Professional, Hardcover: 1998 816 p.

STEINZIG, M; PONSLET, E. Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry: Part I. **Exp Tech**. v. 27, n. 3. p. 43–46. 2003.

SUTERIO, R. et al. Análise metrológica de um dispositivo de simulação de tensões residuais. **METROLOGIA 2003 - Congresso Internacional**

de Metrologia, SBM - Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife, PB, 1 a 5 de setembro, 2003.

SUTERIO, R. et al. Avaliação de um simulador de tensões residuais. **7o. Coteq - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos / VIII SAET - Seminário de Análise Experimental de Tensões**, Florianópolis, SC, 9 a 12 de setembro, 2003.

SUTERIO, R. et al. Avaliação preliminar de métodos alternativos de medição de tensões residuais por indentação e por aquecimento localizado, combinados a holografia eletrônica. **COTEQ / VII SAET - Simpósio de Análise Experimental de Tensões**, Salvador, BA, 19-21 Ago., 2002.

SUTERIO, R. et al. Residual stress measurement using indentation and a radial in-plane ESPI interferometer. **Laser Metrology 2005, 8th International Symposium on Laser Metrology, Macro, Micro, and Nano-Technologies applied in Science, Engineering, and Industry**. Merida, Mexico, 14-18 Fev., 2005.

SUTERIO, R. **Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica**. 2005. 170f. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) – Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; AMARAL, F. K. Residual stress measurement using Indentation and a radial ESPI interferometer – recent progress. **ICEM12 – 12th International Conference on Experimental Mechanics**, Politécnico di Bari, Italy, Agosto-Setembro, 2004.

SUTERIO, R; ALBERTAZZI JR., A. G.; CAVACO, M. A. M. Preliminary evaluation: the indentation method combined with a radial interferometer for residual stress measurement. **SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics**, SEM - Society for Experimental Mechanics, Charlotte, North Carolina, USA, 2-4 Junho, 2003.

UNDERWOOD, J. H. Residual Stress Measurement using surface displacements around an indentation. **Experimental Mechanics**, p. 373-380, Set. 1973.

VEIGA, C. L. N. **Aplicações do interferômetro radial plano na medição de translação, deformações e tensões mecânicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).- Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

VEIGA, C. L. N.; ALBERTAZZI JR., A. Aplicação do interferômetro radial na medição do estado plano de tensões. **METROLOGIA 2000 - Congresso Internacional de Metrologia**, São Paulo - SP, Dez. 4-7, 2000.

VELDKAMP, W. B.; MCHUGH, T. J. Binary optics. **Scientific American**, p.92-97. Maio de 1992.

VETELINO, J; REGHU, A. **Introduction to sensors**. 1 ed. CRC Press. 2010. 208 p.

VIEIRA JR. et al. **Tensões residuais desenvolvidas pela deposição de plasma com arco transferido de ligas a base de Co**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS-CBECIMAT 2002. Natal. p. 2680-2686.

VIOTTI, M. R. et al. Residual Stress Measurement Using a Radial In-Plane Speckle Interferometer and Laser Annealing: Preliminary Results. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 42, n. 1, p. 71- 84, Julho 2004.

VIOTTI, M. R. et al. Residual stress measurement using a radial in-plane speckle interferometer and laser annealing. **SPIE - The International Society for Optical Engineering, Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III**, Wolfgang Osten, Malgorzata Kujawinska, Katherine Creath; Eds., Munich, Germany, Proc. SPIE v. 5144, p. 571-577, 23-26 Junho, 2003.

Vocabulário internacional de metrologia conceitos fundamentais e gerais de metrologia e termos associados (VIM), 1 ed. Rio de janeiro: Inmetro, 2008.

WAGNER, L.; LUETJERTNG, G. Influence of shot peening on the fatigue behavior of titanium alloys . **First International Conference on Shot Peening**, p. 351 - 357, Paris, 1981.

WANG, R.; XIANGBIN, L.; YONGGUI et al. Investigation on the microstructure in shot peening surface straining layer of materials. **First Conference on Shot Peening**, p.185 - 192, Paris, 1981.

WILLEMANN, D. P. **Desenvolvimento de uma roseta óptica para medição de tensões e deformações utilizando holografia eletrônica**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

WITHERS, P. J. A. Overview: residual stress. Part 1: measurement techniques. **Journal of Materials Science and Technology**, v.17, p.355-365, Abr., 2001.

WITHERS, P. J. A. Overview: residual stress. Part 2: nature and origins. **Journal of Materials Science and Technology**, v.17, p. 366-375, Abr., 2001.

WU, S. Y.; QIN, Y. W. Determination of residual stresses using large shearing speckle interferometry and the hole drilling method. **Optics & Lasers in Engineering**, v. 23, p. 233-244, 1995.

WU, Z. et al. Study of residual stress distribution by a combined method of moiré interferometry and incremental hole-drilling—part I, theory, **J Appl Mech**; v. 65, n. 9. 1998.

Wu, Z., **Détermination des contraintes résiduelles par interférométrie de moiré et méthode de perçage du trou incremental**. 1998. Tese de Doutorado, Université de Technologie de Troyes, Troyes.

WU, Z.; LU, J.; HAN, B. Study of residual stress distribution by a combined method of moiré interferometry and incremental hole-drilling—part II, implementation, **J Appl Mech**; 65 (9), 1998.

WU, Z.; LU, J.; JOULAUD, P. Study of residual stress distribution by moiré interferometry incremental hole drilling method, **The Fifth Int. Conf. on Residual Stresses**, Linkoping, Sweden, 1997.

YAN, J. ;KARLSSON, A. M.; CHEN, X. Determining plastic properties of a material with residual stress by using conical indentation. **International Journal of Solids and Structures**. n. 44, p. 3720–3737. 2007.

ZAMRIK, S.Y; PANGBORN, R. N. Fatigue damage assessment using x-ray diffraction and life prediction methodology. **Nuclear Engineering and Design**, 116, p. 407 - 413, 1989.